INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
EVOLUCIÓN DEL LENGUAJE | FORMACIÓN DE CÚMULOS ESTELARES | ENJAMBRES DE INSECTOS ARTIFICIALES
N.º 440
MAYO 2013

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Mayo 2013 InvestigacionyCiencia.es
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ASTROFÍSICA
Formación de cúmulos estelares

TECNOLOGÍA
Enjambres de insectos artificiales

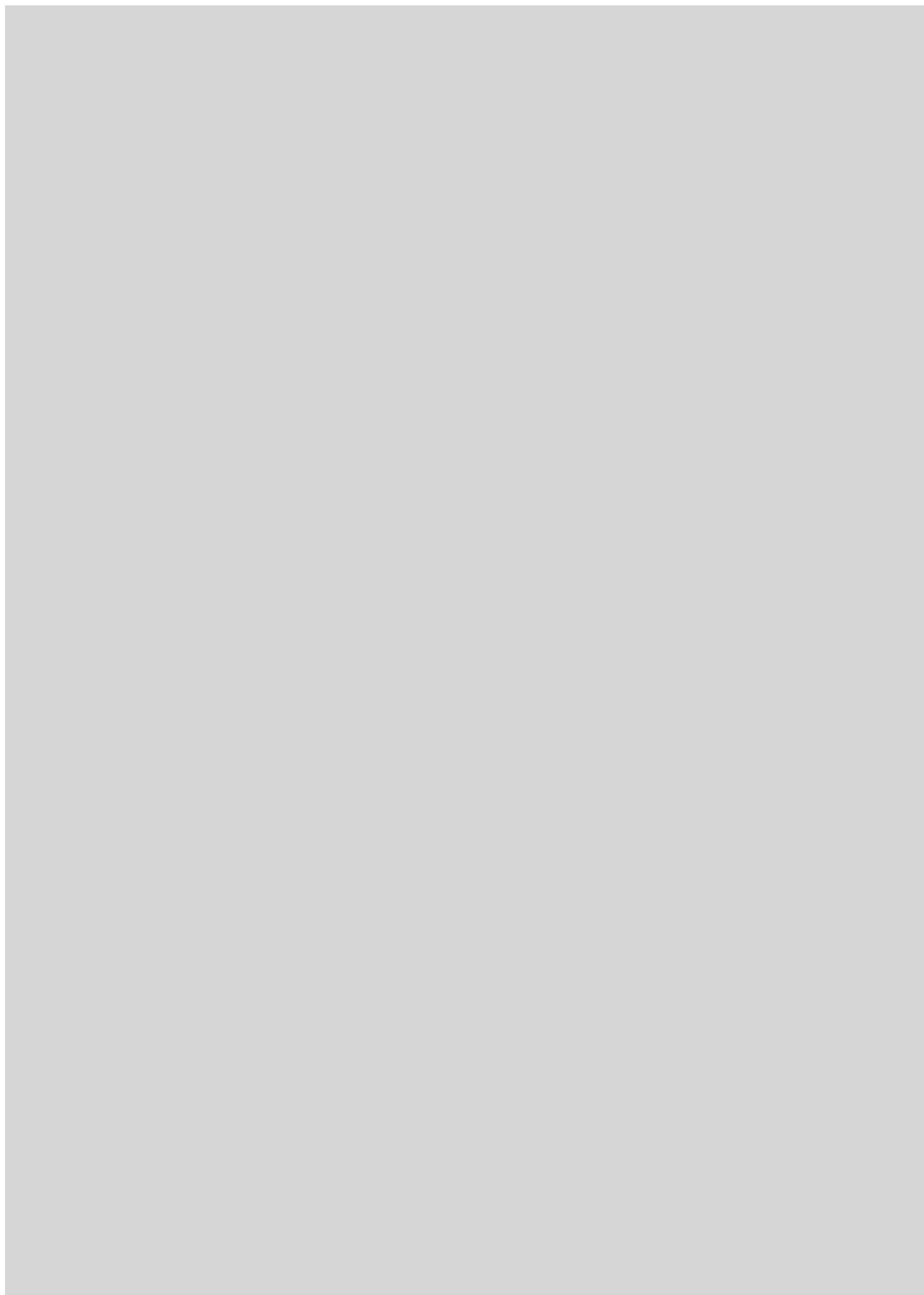
EPIDEMIAS
La amenaza de los poxvirus

Evolución del lenguaje

Nuevas aportaciones de la teoría de redes



6,50 EUROS



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Mayo 2013, Número 440

18

ARTÍCULOS

DAVID PALUMBO





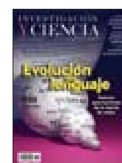


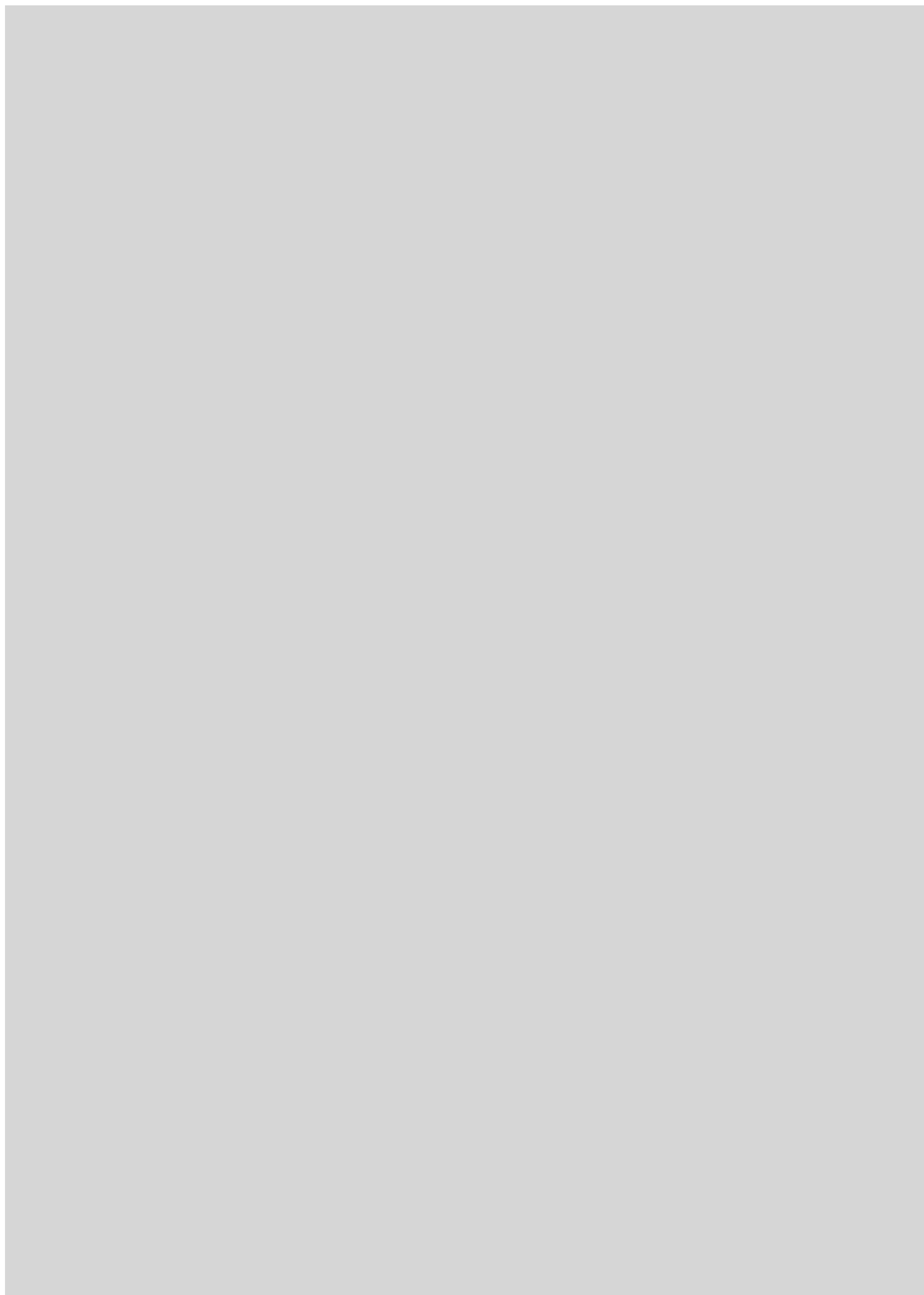
INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Desde hace unos años, físicos, matemáticos y lingüistas se han embarcado en un nuevo y sugerente programa de investigación interdisciplinar. La adopción de técnicas procedentes de la teoría de redes está permitiendo abordar de manera novedosa el estudio de la semántica, la sintaxis y los orígenes del lenguaje. Diseño de portada: Ricard V. Solé y Iosebah Santiago; realización: *Investigación y Ciencia*.





redaccion@investigacionyciencia.es



Agosto 2012

CEREBRO Y GENOMA

En «El proyecto cerebro humano» [Investigación y Ciencia, agosto de 2012], Henry Markram explica cómo se persigue crear una gran simulación digital del cerebro. La audacia del proyecto resulta sobrecogedora. Sin embargo, a la vista del éxito pasado en el desciframiento del genoma, tal vez podríamos pensar que tampoco aquí ninguna dificultad acabará siendo insalvable.

¿Qué obstáculos podría plantear el cerebro que no hayan tenido que solucionarse en el desciframiento del genoma? Si el único problema fuese el grado de complejidad del objeto de estudio, la creciente capacidad de simulación digital de los ordenadores tal vez podría hacerle frente. Sin embargo, puede que el problema sea de otra naturaleza: mientras que el genoma corresponde a un objeto estático, el cerebro es dinámico.

El genoma de cada individuo permanece idéntico desde que nace hasta que muere. Algo así no ocurre con el cerebro. Todos venimos al mundo dotados de un cerebro que podemos llamar «elemental», pero con una potencialidad enorme. El cerebro de cada ser humano se va configurando a lo largo de su vida gracias a las experiencias, las cuales pueden ser muy variadas e imprevisibles, pero sobre todo mediante los actos de la voluntad, más imprevisibles aún. En esto consiste precisamente su dinamismo: un dinamismo que dejaría de ser tal el día que se lo pudiese digitalizar. Al final, nos toparemos con un problema al que solo la filosofía podrá hacer frente.

Julián Sanz Pascual
Segovia

MÁS DUDAS SOBRE EL ITER

En el número de marzo, Joaquín Sánchez responde con claridad a una pregunta de José Álvarez García sobre las posibles emisiones del reactor de fusión ITER [«Apuesta de futuro», por Joaquín Sánchez; Investigación y Ciencia, enero de 2013]. Sin embargo, su explicación solo hace referencia a la manera de evitar las fugas durante el funcionamiento del reactor, por lo que cabe preguntarse por el proceso de mantenimiento. ¿Cada cuanto tiempo tendrán que sustituirse las piezas de la envoltura protectora? ¿Serán estas piezas radiactivas? ¿Dónde se guardarán? ¿Durante cuánto tiempo?

Mariano Vázquez Espí
Grupo de Investigación
en Arquitectura, Urbanismo
y Sostenibilidad
Universidad Politécnica de Madrid

Responde Sánchez: *La envoltura principal podrá mantenerse muy probablemente durante toda la vida del reactor. Sin embargo, con los conocimientos actuales sobre la forma de operación, tal vez su parte inferior deba ser renovada con frecuencia (cada pocos años). En esta zona se concentra la interacción del plasma con la pared, lo que erosiona el material. Aquí el plasma no se encuentra tan caliente como en el centro del reactor, pero aún conserva temperaturas considerables (unos 50.000 grados Kelvin).*

Las piezas que se extraigan del reactor para su sustitución estarán activadas debido al bombardeo de los neutrones producidos en la reacción de fusión; es decir, si bien en origen no eran radiactivas, pasarán a serlo. Se trata de componentes con bajos niveles de radiactividad, los cuales podrían reciclarse por completo en unos cien años. Durante ese tiempo deberán permanecer bajo custodia, como otros residuos de media y baja actividad. En España, tales residuos se almacenan en las instalaciones de El Cabril (Córdoba).

Existe la posibilidad de que, en vez de sustituir las piezas completas, baste con reemplazar solo la parte que se halla en contacto con el plasma. Ello limitaría el conjunto a dos juegos que se irían alternando: uno en operación, otro en restauración. Esta opción reduciría de manera considerable el inventario de material activado.



Marzo 2013

Errata corrige

En el artículo «Escarabajos xilófagos» del número de mayo, al final del segundo párrafo debe sustituirse el término «litografías» por «xilografías».

En el artículo del número de marzo «IceCube: Astrofísica desde el hielo», de Carlos Pérez de los Heros, se dice en la pág. 68 que la sincronización entre el reloj de los módulos ópticos y el sistema GPS asciende a «mil millonésimas de segundo». El valor correcto es una milmillonésima de segundo (i.e. un nanosegundo).

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



MICROBIOLOGÍA

Microbios en las alturas

En 1860, Louis Pasteur abrió un frasco de cristal en el glaciar Montanvert, en los Alpes franceses, y recogió una muestra de aire. Unos días después, el fondo de dicho frasco estaba repleto de una sustancia viscosa, una prueba para Pasteur y sus colegas de que en el aire había algo, invisible pero muy real. Hoy en día, entendemos qué constituye ese ente invisible: los microbios presentes en nuestra atmósfera. Sin embargo, a pesar de que han pasado más de 150 años desde el experimento de Pasteur, los científicos aún están empezando a comprender cómo afectan a la vida en la Tierra los microorganismos del aire.

Recientemente, un equipo de científicos capturó más de 2100 especies de microbios que atravesaban el océano Pacífico, desde Asia hasta Norteamérica, en grandes columnas de aire en la troposfera superior, a una altura de hasta veinte kilómetros sobre la superficie de la Tierra. Buena parte de los microorganismos eran bacterias, con el consiguiente riesgo para la salud humana. En África, en una región conocida como el cinturón meningítico, las tormentas de polvo transportan la bacteria *Neisseria meningitidis* (*imagen*), que infecta a unas 200.000 personas de esa zona cada año. Sin embargo, para la mayoría de la gente en la mayor parte de lugares, los microbios del aire son totalmente inofensivos, señala David Smith, microbiólogo del Centro Espacial Kennedy de la NASA y autor principal del estudio sobre los 2100 microbios viajeros. «No hay que preocuparse», afirma Smith, cuyos hallazgos fueron publicados en línea el pasado mes de diciembre en la revista *Applied and Environmental Microbiology*. «Esto siempre ha sucedido de forma natural».

Más allá de los aspectos relativos a la salud, los microbios de la atmósfera también podrían ser importantes para el clima. «Estamos interesados en saber si contribuyen a la formación de los núcleos de condensación de las nubes», explica Susannah Burrows, científica especializada en fenómenos atmosféricos del Laboratorio Nacional del Pacífico Noroeste en Richland, Washington. Las bacterias pueden agruparse generando la semilla en torno a la cual se forma la nube y pueden, por tanto, constituir un componente clave de nuestra atmósfera, apunta.

Otros investigadores se preguntan cómo se comportan los microorganismos mientras se hallan suspendidos en el aire y si pueden reproducirse al tiempo que viajan. «Tenemos varios indicios de que los microbios del aire están vivos y activos», no son simples pasajeros, afirma Paraskevi Polymenakou, microbiólogo atmosférico del Centro Helénico de Investigación Marina en Grecia.

Para Dale Griffin, microbiólogo del Servicio Geológico de los Estados Unidos, las preguntas van más allá de la atmósfera. «No importa lo alto que miremos, parece que siempre encontramos vida», señala. Smith no solo se cuestiona hasta qué altura se puede encontrar vida, sino también cómo sobrevive tan arriba. «Cuando era estudiante de biología, creía que todo se había investigado ya», comenta. «La atmósfera nos da la oportunidad de estudiar un lugar en el que nadie había buscado vida anteriormente». —*Rose Eveleth*

DENNIS KUNKEL MICROSCOPY, INC. CORBIS

MATEMÁTICAS

Cómo se dobla un muelle

Una noticia que puede interesar a los entusiastas del *camping* y a los aspirantes a escultores modernos: los investigadores han conseguido un gran avance en la comprensión y el control de la hipercurvatura, que se encuentra en lugares tan dispares como las tiendas de campaña automontables, los plásmidos de ADN y la papiroflexia. La hipercurvatura se produce cuando un anillo se halla demasiado curvado para reposar en una superficie plana como lo haría un círculo perfecto. Por ejemplo, si uno corta un segmento de un muelle elástico y conecta sus extremos para formar un aro cerrado, será muy difícil conseguir que el elemento permanezca estable sobre un suelo plano. La curvatura intrínseca de los aros del muelle hará que el anillo se combe y adopte una forma tridimensional de silla de montar.

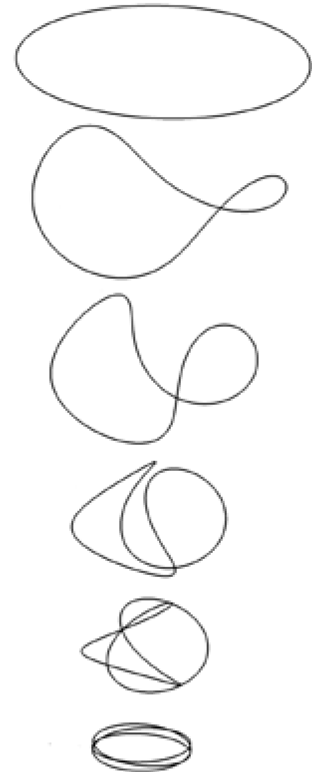
De hecho, los muelles elásticos desempeñaron un papel importante en este proyecto de investigación, cuyos resultados fueron publicados en la revista *Nature Communications* el pasado mes de diciembre. Después de observar anillos hipercurvados de distintos tamaños y materiales, los investigadores encontraron una familia de curvas con una descripción matemática bastante simple que, en su opinión, constituiría un buen modelo para las formas que estos anillos hipercurvados toman en el espacio.

Utilizaron aros fabricados con partes de muelles de plástico para realizar mediciones precisas y encontraron que las curvas que habían predicho se ajustaban a lo que observaban en los aros de los muelles de plástico. «Nos sorprendió mucho», afirma Alain Jonas, científico de materiales de la Universidad Católica de Lovaina, que dirigió la investigación. «Es una de esas ocasiones en las que uno idea una posible solución y es justo la correcta».

El estudio incluye unas indicaciones eficaces para plegar tiendas automontables y otros anillos hipercurvados, tal como se muestra en la imagen. Para plegar un anillo en tres aros, coloque sus manos en dos extremos opuestos del anillo. Mientras las sube, acerque una a otra y tome ambos lados en una sola mano. Utilice la que queda libre para presionarlos hacia abajo y uno hacia el otro con el objetivo de lograr la forma de silla de montar. Empuje un lado sobre el otro, tanto por la parte superior como por la inferior, y junte los tres aros.

La propuesta difiere del enfoque que suele elegir la gente. Requiere más energía al inicio, pero en conjunto utiliza menos. «No resulta muy intuitivo», señala Jonas, «pero es lo que requiere la física del problema». Después de realizar la investigación, tomó prestada la tienda de campaña de un amigo para practicar la técnica que él y sus colaboradores habían desarrollado. Fue un éxito.

—*Evelyn Lamb*



¿QUÉ ES ESTO?

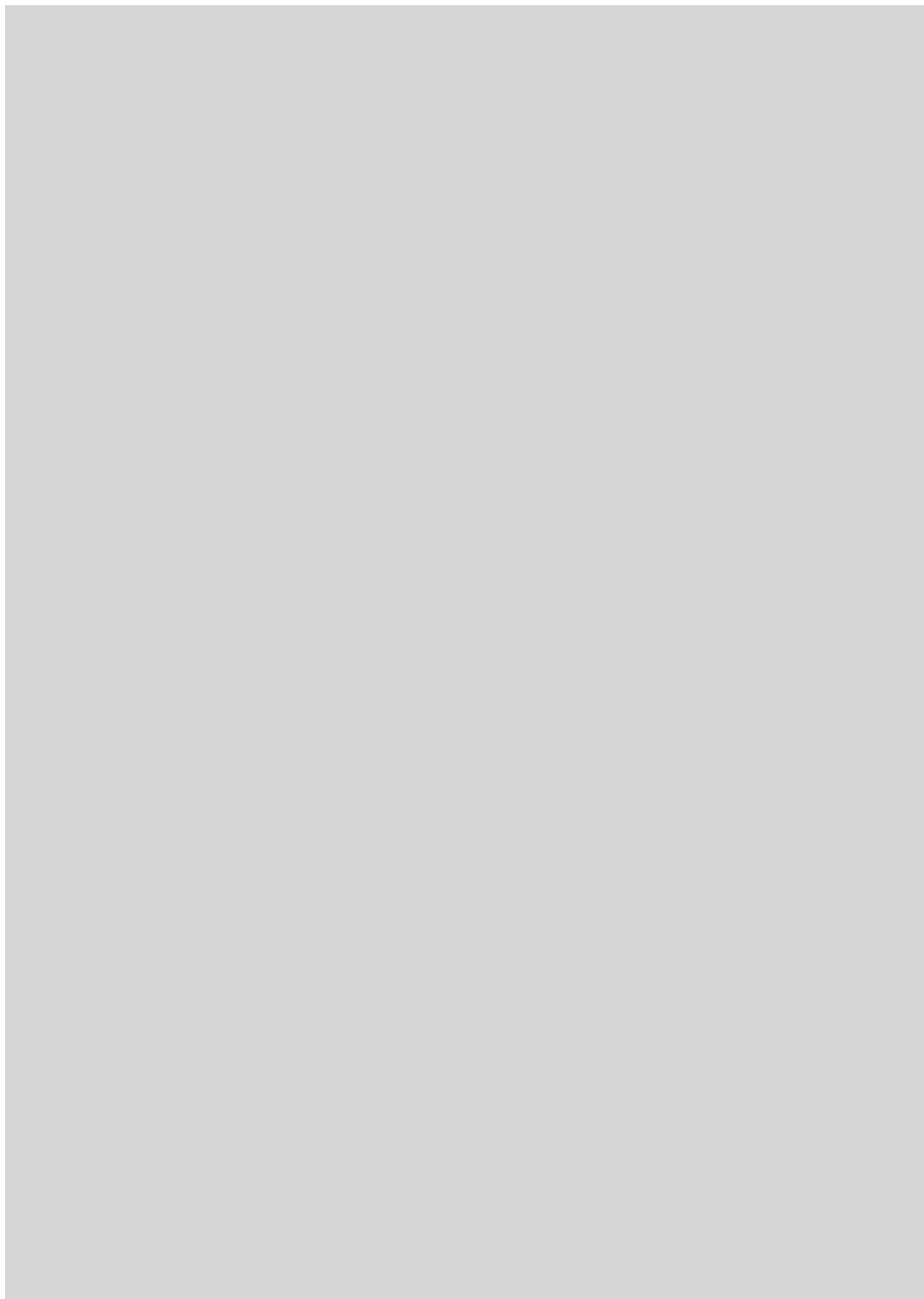


Siempre verdes: Los pinos, que pueden crecer durante miles de años, son los árboles vivos más antiguos que existen. Los científicos, sin embargo, han descubierto que las palmeras pueden ser más longevas, al menos a nivel celular. Un artículo reciente publicado en la revista *American Journal of Botany* explica que la mayoría de los árboles experimentan una fase de crecimiento secundaria, en la que se sustituyen tejidos funcionales por células más jóvenes, pero las palmeras no. Las células de una palmera, vistas en esta micrografía de un ejemplar del género *Veitchia*, perduran a lo largo de toda la vida del árbol, que puede estar entre los 100 y los 740 años.

Esta sección transversal de 1,5 milímetros de ancho de un haz vascular (*centro rojo y verde*) se encarga de transportar agua, minerales y nutrientes por el tronco. Se pueden encontrar miles de estos haces en cada nivel de la palmera, funcionando sin interrupción para mantener su crecimiento.

—*Ann Chin*

DE «OVERCURVATURE DESCRIBES THE BUCKLING AND FOLDING OF RINGS FROM CURVED ORIGAMI TO FOLDABLE TENTS», POR PIERRE-OLIVIER MOUTHUY ET AL., EN *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 3, N.º 1290; 18 DE DICIEMBRE DE 2012 (*muelle*); DE «CELL LONGEVITY AND SUSTAINED PRIMARY GROWTH IN PALM STEMS», POR P. BARRY TOMLINSON Y BRETT A. HUGGETT, EN *AMERICAN JOURNAL OF BOTANY*, VOL. 99, N.º 12, DICIEMBRE DE 2012 (*haz vascular*)



ASTEROIDES

Cerca, pero no demasiado

El pasado 9 de enero, el asteroide Apofis, de unos 300 metros de diámetro, se aproximó a la Tierra. Aunque pasó a una distancia tranquilizadora (mucho más allá de la órbita de la Luna), el objeto no se había acercado tanto a nuestro planeta desde 2004, año en que fue descubierto. Poco después de su hallazgo, los astrónomos temieron durante un tiempo que Apofis impactase contra la Tierra en un futuro, pero las últimas observaciones han atenuado estas preocupaciones. Con todo, Apofis se acercará mucho más en 2029, cuando pasará a unos 35.000 kilómetros de la Tierra (unas cinco veces el radio de nuestro planeta). Y, al menos por el momento, sigue existiendo una minúscula probabilidad de colisión para 2036.



El caso de Apofis se asemeja al de otros asteroides potencialmente peligrosos. En un principio, la incertidumbre inicial en el cálculo de su órbita revela una probabilidad de que el objeto golpee algún día nuestro planeta, pero observaciones posteriores rebajan ese riesgo hasta niveles insignificantes.

Así sucedió con el asteroide 2011 AG5, al que inicialmente se asoció una pequeña probabilidad de impacto para el año 2040. Descubierta hace dos años, esta roca de 140 metros de diámetro es una de las que hasta la fecha han obtenido una puntuación superior a 0 en la escala de Turín. Esta cuantifica el riesgo de que un cometa o un asteroide impacte contra la Tierra con una valoración comprendida entre 0 y 10. La de Apofis es 0.

En 2011, el asteroide 2011 AG5 recibió una puntuación igual a 1, lo que se traduce en una colisión «extremadamente poco probable, sin razón para la atención o alarma del público». Este resultado lo equiparó con el asteroide más amenazador detectado hasta el momento, 2007 VK184, al que se le asigna una probabilidad de impacto de 1 entre 1820 para el año 2048.

Sin embargo, nuevos datos publicados el pasado diciembre disiparon la amenaza del 2011 AG5. En octubre, David Tholen, astrónomo de la Universidad de Hawái, y otros investigadores determinaron su órbita con una precisión suficiente como para limitar los posibles itinerarios que el objeto seguirá en el futuro. Sus resultados implican que, en 2040, 2011 AG5 pasará junto a la Tierra a la tranquilizadora distancia de unos 900.000 kilómetros (la separación media entre la Tierra y la Luna asciende a unos 380.000 kilómetros). «En conclusión, no existe riesgo de impacto para el año 2040», señala Tholen.

—John Matson

HISTORIA DE LA TÉCNICA

Limpiaparabrisas intermitentes

El origen de algunos de los inventos más sencillos es a veces más recordado por las disputas legales que acarrearon que por el ingenio de sus creadores. En los anales de los famosos pleitos sobre patentes, el limpiaparabrisas intermitente ocupa un lugar privilegiado. La génesis de este dispositivo, útil pero aparentemente secundario, llegó a interesar incluso a los guionistas de Hollywood en su búsqueda de historias del tipo de la de David y Goliat, que en 2008 la convirtieron en el argumento de la película *Destellos de genio*.

La historia gira en torno de un brillante e idiosincrásico profesor de universidad llamado Robert Kearns. Cegado casi por completo en 1953 al descorchar una botella de champán en su noche de bodas, Kearns se percató de que el monótono barrido de las escobillas del limpiaparabrisas perjudicaba su ya sufrida visión, tal y como suele contarse en la versión más extendida de los acontecimientos.

A partir de componentes electrónicos sencillos y fáciles de adquirir, Kearns ideó en 1963 unos limpiaparabrisas que limpiaban la superficie y luego se detenían. El ingeniero hizo una demostración de su invento ante la Ford, a quien acabó revelando algunos detalles sobre su funcionamiento. La compañía decidió no comprar las escobillas a una compañía de Detroit a la que Kearns había cedido sus derechos de patente y, en su lugar, se dispuso a desarrollar su propio limpiaparabrisas intermitente.

En 1976, mientras trabajaba en la Oficina Nacional de Normalización de EE.UU., Kearns desmontó un sistema comercial de escobillas limpiadoras y concluyó que la Ford había copiado su diseño. Al recobrarse de la crisis nerviosa que ello le produjo, comenzó una batalla legal que habría de prolongarse hasta los años noventa. Kearns reclutó a varios de sus hijos para que le ayudasen a preparar las demandas contra algunos de los mayores fabricantes de automóviles y, en ocasiones, llegó a actuar como su propio abogado. Al final, los tribunales dictaminaron que Ford y Chrysler habían infringido los derechos de patente de Kearns y sancionaron a las compañías a indemnizarle por un total de unos 30 millones de dólares.



Los críticos sostienen que la idea de Kearns viola un criterio esencial en toda patente: el invento no debería resultar «obvio» para alguien familiarizado con la construcción de artefactos similares. En su defensa, la Ford argumentó que el temporizador electrónico —clave de la invención de Kearns— era, cuando menos, muy evidente. Con todo, los argumentos de Kearns persuadieron a los jueces en aquellos dos casos (si bien no en otros posteriores), lo cual acabaría por convertirlo en un auténtico héroe de los pequeños inventores.

—Gary Stix

THOMAS FUCHS (*asteroide*); © 555DIGIT/ISTOCKPHOTO (*limpiaparabrisas*)

OCEANOGRAFÍA

Más allá de la superficie del océano

Varios expertos están analizando los datos obtenidos por el submarino robótico *Papa Mau*. A finales del año pasado, este batiscafo cruzó el océano Pacífico de punta a punta, con lo que batió el récord de distancia recorrida por un vehículo marino autónomo. El ingenio, del tamaño de una tabla de surf e impulsado por las corrientes marinas, recorrió los 16.668 kilómetros que median entre San Francisco y la bahía de Hervey, en Australia. En su travesía obtuvo gran cantidad de información sobre las corrientes oceánicas, la velocidad del viento y algunos de los organismos esenciales para la vida marina.

El *Papa Mau*, que permaneció en el mar durante más de un año, forma parte de una flota de cuatro vehículos robóticos fabricados por la empresa californiana Sunnyvale. El director ejecutivo de la compañía, Bill Vass, sostiene que sus submarinos proporcionan datos más precisos que los de los satélites empleados para medir la velocidad del viento, la altura de las olas o la proliferación de algas. Según Vass, los satélites estiman esas cantidades «lo mejor que pueden» desde una altura de 400 kilómetros y, además, solo pueden estudiar las condiciones cerca de la superficie del agua. Los submarinos, en cambio, miden la amplitud de las corrientes en su totalidad. Ello revertiría en una mejor determinación de la velocidad y dirección de las corrientes, con consecuencias notables para el sector naviero, la extracción de petróleo y gas o la meteorología.

Oscar Schofield, profesor de oceanografía bioóptica de la Universidad Rutgers, conviene en que los satélites sufren limitaciones, pero arguye que constituyen la única forma de obtener una visión global del océano, aunque esta se reduzca a la superficie. La cuestión reside en cómo obtener una reconstrucción tridimensional de los fenómenos que acontecen en las profundidades. Scott Glenn, profesor de Rutgers especializado en oceanografía física, señala que una combinación de datos tomados por satélites y por submarinos podría proporcionar una imagen más completa del océano. Los satélites generan mapas del estado del mar en cada instante, mientras que los submarinos y las naves de superficie aportan perfiles verticales del agua y pueden dirigirse hacia las zonas de mayor interés, explica Glenn.

Liquid Robotics ha elegido a cinco expertos para que estudien los datos obtenidos por el *Papa Mau* y sus otras naves robóticas. Investigadores de la Universidad de California en Merced, la Universidad de California en Santa Cruz, el Instituto Oceanográfico Scripps de la Universidad de Texas en Austin, así como de la compañía informática Wise Eddy emplearán esa información para analizar la salud y la respiración del océano, su biomasa y otros aspectos esenciales para la vida marina.

—Karen A. Frenkel

Nave robótica cerca de la costa de Hawái.

CORTESÍA DE LIQUID ROBOTICS (*submarino*); PARQUE DE LAS CIENCIAS (*menhir*)

AGENDA

CONFERENCIAS

14 de mayo
Evolución del habla y la música: de los monos a los humanos
Josef Rauschecker, Hospital de la Universidad Georgetown
Cosmocaixa, Barcelona
www.obrasocial.lacaixa.es

16 de mayo
Las levaduras como modelos y herramientas
Carlos Gancedo, Instituto de Investigaciones Biomédicas Alberto Sols
Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid
Ciclo de conferencias del cincuentenario de la SEBBM
www.sebbm.es/ES/50-aniversario_16

27 de mayo
***Smart citizen*: sensores en tu balcón**
Tomás Díez, Fab Lab Barcelona e Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña
Ciclo «Ciudadanos + investigadores = ciencia»
Biblioteca Sagrada Familia, Barcelona
bit.ly/14p0btR

OTROS

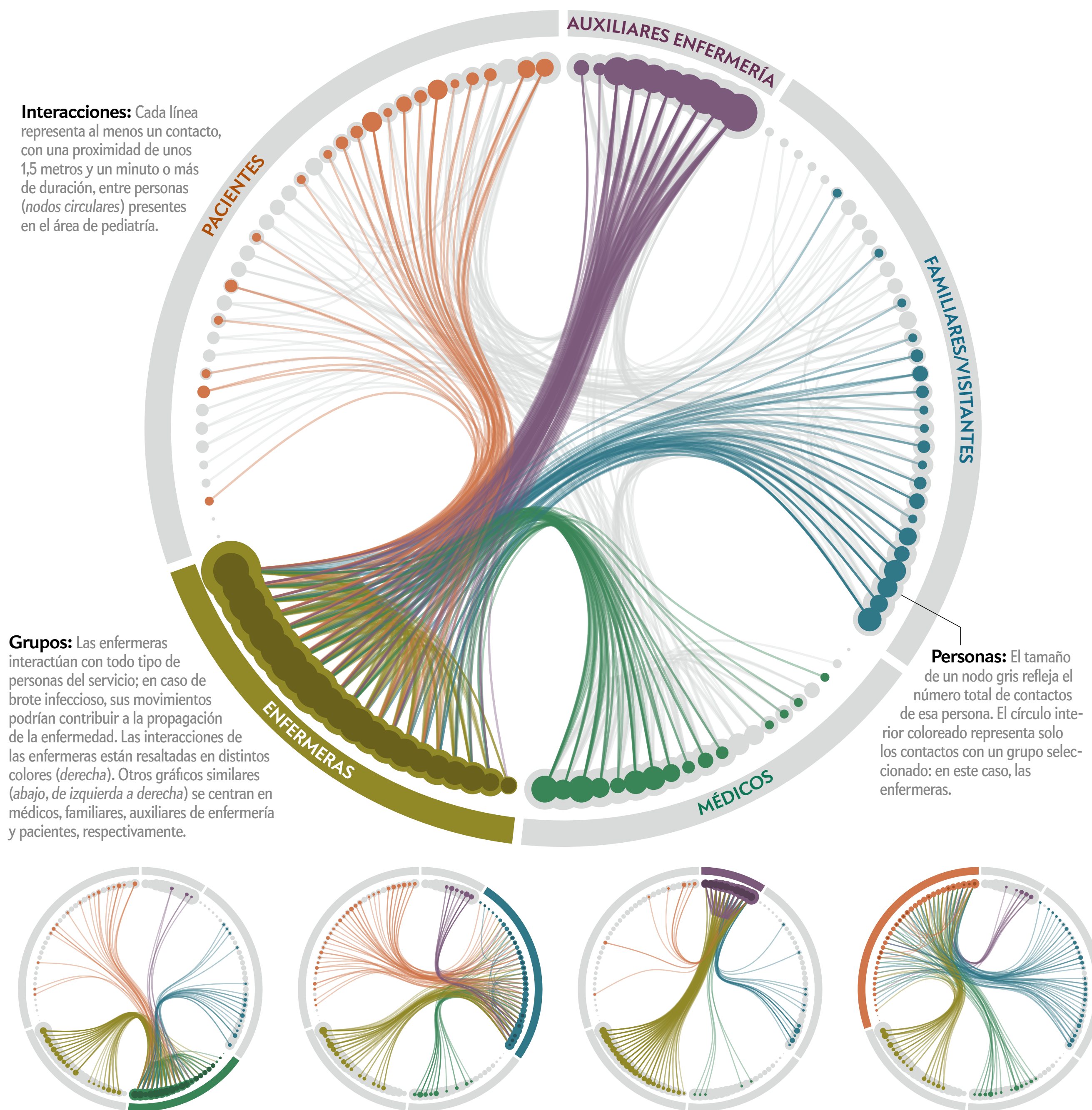
2 de mayo - Cine
«La habitación del hijo», Nanni Moretti, Italia, 2001
Ciclo «El psicoanálisis en el diván»
Instituto de Historia de la Medicina y de la Ciencia López Piñero, Valencia
www.ihmc.uv-csic.es/peliculas.php

11 de mayo – Experimento público
Izar un menhir
Parque de las Ciencias, Granada
www.parqueciencias.com



11 y 12 de mayo – Curso
Observación e identificación de artrópodos en el campo
Eduardo Mateos Frías, Universidad de Barcelona
Museo Archivo Municipal Vilassar de Dalt, Barcelona
ichn.iec.cat/pdf/CURSOS_2013.pdf

18 de mayo
Día internacional y noche de los museos
imd.icom.museum



FUENTE: «CLOSE ENCOUNTERS IN A PEDIATRIC WARD: MEASURING FACE-TO-FACE PROXIMITY AND MIXING PATTERNS WITH WEARABLE SENSORS», POR LORENZO ISELLA ET AL., EN *PLoS ONE*, VOL. 6, N.º 2, 28 DE FEBRERO DE 2011; JAN WILLEM TULP (*gráficos*)

SALUD

Líneas de defensa

Los patrones del contacto entre personas revelan las vías de transmisión de enfermedades

Acudir a un hospital no debería ponernos enfermos. Sin embargo, muchas personas contraen algún mal mientras están hospitalizadas. En algunos países, las llamadas infecciones nosocomiales afectan a más del diez por ciento de los pacientes.

Para investigar las vías de transmisión, un grupo de investigadores asignó tarjetas de identificación por radiofrecuencia a 119 personas del área de pediatría de un hospital. Las tarjetas registraban las interacciones personales y, por tanto, la posible transmisión de patógenos que se propagan por el aire.

Las enfermeras interactuaron con la mayor variedad de personas, entre ellas, pacientes, médicos y otras enfermeras. El estudio indica que debería darse prioridad a ese grupo cuando se planifican estrategias para prevenir o controlar brotes infecciosos en los hospitales.

—John Matson

FÍSICA

El antiimán

Cómo hacer invisible el campo magnético

Hacerse invisible ha sido siempre uno de los grandes sueños del ser humano. La cultura popular ha plasmado esta fantasía en todo tipo de obras, desde el mito griego de Perseo hasta *El hombre invisible*, de H. G. Wells, o Harry Potter. Pero ¿cómo tornar invisible un objeto?

En principio caben dos posibilidades: conseguir que el objeto se vuelva transparente al paso de la luz (como el protagonista de la novela de H. G. Wells), o bien revestirlo con una «capa de invisibilidad» que haga que la luz que llegue hasta su superficie la rodee y continúe después por el mismo camino que hubiera tomado en caso de que el cuerpo no existiese (como la capa de Harry Potter). Aunque la primera estrategia pertenece aún al ámbito de la ciencia ficción, algunos avances recientes han situado las capas de invisibilidad en el marco de la más rigurosa investigación científica.

La revolución en capas de invisibilidad data de 2006, cuando John Pendry, del Colegio Imperial de Londres, y sus colaboradores propusieron la teoría de la óptica de transformación. Aquel trabajo demostró la posibilidad de desviar la trayectoria de la luz de la manera deseada si, para ello, se empleaban ciertos materiales dotados de propiedades eléctricas y magnéticas muy exóticas.

Sin embargo, la fabricación de tales materias —inexistentes en la naturaleza— se encuentra plagada de dificultades. Y aunque el empleo de metamateriales (redes artificiales cuya microestructura les confiere propiedades singulares) ha permitido construir algunas capas de invisibilidad, estas solo operan en determinadas frecuencias, como las microondas, y de manera parcial. Más que tornar un objeto invisible, se limitan a reducir su visibilidad.

Hace dos años, y siguiendo de nuevo una línea iniciada por Pendry, nuestro grupo de la Universidad Autónoma de Barcelona decidió investigar la posibilidad de hacer un objeto «invisible» no a la luz, sino al campo magnético. A fin de cuentas, este objetivo no dista tanto del original, ya que la luz no es más que un campo electromagnético que se propaga en el espacio.

En condiciones normales, dos imanes cercanos experimentarán una atracción o una repulsión mutua. Pero ¿sería posible rodear uno de ellos con una capa de invisibilidad magnética —un «antiimán»— de modo que dicha interacción desapareciese y el segundo imán se comportase como si el primero no existiese? Dadas las innumerables aplicaciones del magnetismo en la tecnología actual (desde la generación y transporte de energía hasta los motores o las memorias informáticas), un antiimán resultaría de utilidad en un sinfín de campos.

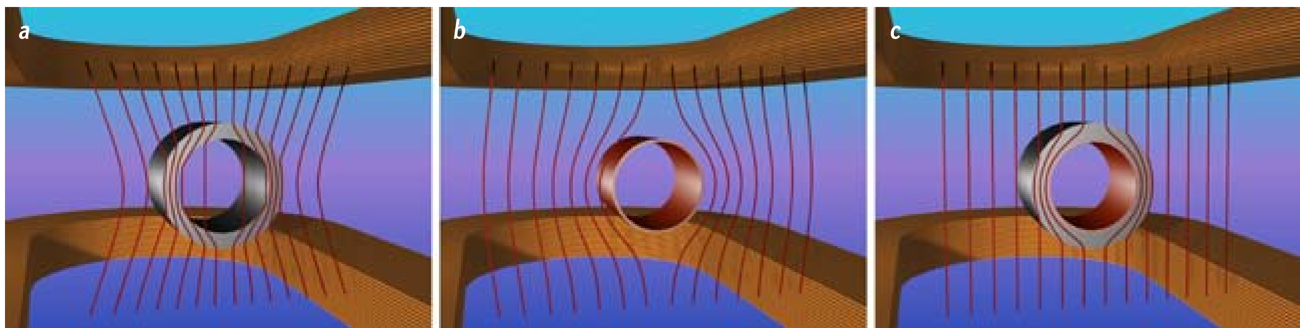
¿Capas perfectas?

En septiembre de 2011 publicamos un artículo en el *New Journal of Physics* en el que describíamos una propuesta teórica para construir un antiimán. Esta constaría de una capa superconductora rodeada a su vez de estratos alternados de material ferromagnético y superconductor. La primera capa evitaría que el campo magnético de su interior (por ejemplo, el de un imán) se transmitiese al exterior; las siguientes contrarrestarían el efecto magnético de la capa superconductora más interna, de modo que el conjunto resultase magnéticamente indetectable.

El concepto de antiimán cuajó entre la comunidad de investigadores dedicados a estudiar la invisibilidad. Sin embargo, nuestro diseño adolecía del mismo problema que las propuestas teóricas para la luz: aunque factible en principio, resultaba extremadamente complicado de llevar a la práctica.

Era el momento de emprender un reto aún mayor: ¿podíamos diseñar una capa de invisibilidad magnética realizable experimentalmente y que, al mismo tiempo, lograse una invisibilidad exacta? En teoría, nuestro antiimán podía tornar invisible cualquier campo magnético. Sin embargo, nos percatamos de que cuanta mayor uniformidad espacial exhibiese dicho campo, menos capas de material superconductor y ferromagnético serían necesarias. ¿Podría simplificarse su diseño a tan solo dos capas, una de cada tipo, de modo que funcionase con campos magnéticos estáticos y uniformes?

Aquel fue uno de esos momentos llenos de emoción que en ocasiones embargan a los científicos. Unas horas de trabajo intenso y febril nos llevaron a la demostración matemática del objetivo que buscábamos: una sola capa superconductora rodeada por una capa de material ferromagnético, cuyas dimensiones quedaban determinadas a partir de una sencilla relación matemática, conseguiría hacer



J. PRAT, C. NAVAU Y Á. SÁNCHEZ, UAB

Invisibilidad magnética: Una capa ferromagnética (*a*) o una superconductora (*b*) resultan fácilmente detectables por separado, pues distorsionan la geometría de un campo magnético uniforme (*rojo*). Sin embargo, cuando se combinan de la manera adecuada, la bicapa resultante (*c*) es «invisible» al campo magnético.

indetectable un campo magnético uniforme. Por primera vez se había logrado un diseño que permitía una invisibilidad exacta... y factible, pues bastaban para ello dos capas de materiales conocidos.

El último paso —imprescindible— consistía en verificar empíricamente el hallazgo. Lo logramos gracias a la colaboración del grupo de Fedor Gömöry, del Instituto de Ingeniería Eléctrica de Eslovaquia. Nuestros colegas eslovacos construyeron la bicapa y midieron sus propiedades: el ingenio funcionaba a la perfección. Los resultados fueron aceptados en pocas semanas para su publicación en la revista *Science* en marzo de 2012.

¿Qué futuro nos depara la invisibilidad? Lo que hace apenas diez años parecía relegado a la ciencia ficción pertenece ahora a la ciencia. Nuestro trabajo, así como el de numerosos grupos de todo el mundo, está contribuyendo al diseño de nuevas capas de invisibilidad para diferentes tipos de luz y en condiciones cada vez menos restrictivas. La ciencia ha convertido en realidad varios sueños de la humanidad, como volar, desplazarnos a velocidades antes inconcebibles e incluso visitar otros mundos. El camino está trazado para que la invisibilidad deje de ser un sueño.

—Àlvar Sánchez, Carles Navau y Jordi Prat
Departamento de física
Universidad Autónoma de Barcelona

INMUNOLOGÍA

La malnutrición favorece el desarrollo de bacterias nocivas

La ausencia de un único aminoácido en la dieta altera la comunidad microbiana y disminuye la inmunidad intestinal

La malnutrición aumenta la frecuencia y gravedad de infecciones gastrointestinales y afecciones diarreicas. Pese a que este efecto se observa desde hace décadas, hasta el momento no se conocía con detalle el mecanismo responsable del vínculo existente entre dieta e inmunodeficiencia. En la edición de julio de 2012 de la revista *Nature*, Tatsuo Hashimoto, de la Academia Austriaca de Ciencias y la Universidad de la ciudad de Yokohama, y sus colaboradores analizan la relación entre una dieta pobre en proteínas y la predisposición a padecer inflamación intestinal. Los autores revelan la existencia de una intrincada red en la que se hallan implicados el transporte de nutrientes, la ecología microbiana, las respuestas antimicrobianas y la inflamación.

El cuerpo sintetiza la mayor parte de los aminoácidos a partir de otros compuestos, pero los aminoácidos esenciales se obtienen de la dieta con la ayuda de proteínas transportadoras especializadas. El modelo de estudio escogido por Hashimoto fueron los ratones *Ace2*$^{-/y}$, que carecen del gen que codifica la enzima convertidora de angiotensina 2 (ACE2). En el intestino, esta enzima controla la función de la proteína transportadora B^{0}AT1, que capta tan solo aminoácidos sin carga eléctrica. Los autores del estudio observaron que los animales sin ACE2 presentaban una baja concentración sanguínea de este tipo de aminoácidos esenciales, pero ninguna alteración aparente en la estructura del intestino. La sorpresa llegó cuando administraron a los ratones una sustancia irritante para determinar su sensibilidad a la inflamación intestinal: mientras que los animales normales mostraron solo una inflamación moderada, los que carecían de ACE2 resultaron ser mucho más vulnerables y presentaron diarreas más intensas y un mayor número de células inflamatorias. El resultado sorprendió porque la sustancia administrada induce inflamación en el intestino grueso y en ese lugar apenas se expresa la enzima ACE2 (lo hace sobre todo en el intestino delgado).

Los investigadores se centraron entonces en cierto aminoácido sin carga eléctrica (neutro), el triptófano. Una dieta pobre en él puede causar pelagra, una enfermedad producida por una deficiencia vitamínica que afectó a Europa durante siglos y alcanzó proporciones epidémicas en Estados Unidos a principios del siglo xx. Las mejoras en la alimentación asociadas al nivel de vida actual han limitado la incidencia de esta enfermedad a tan solo algunas regiones en vías de desarrollo y a campos de refugiados. La pelagra se caracteriza por las «cuatro D»: diarrea, dermatitis, demencia y, en casos extremos, defunción. Resulta interesante observar que los pacientes con mutaciones en el gen *B^{0}AT1* pueden sufrir un síndrome similar a la pelagra.

Para comprobar si existía una relación directa entre la absorción de triptófano y la presencia de daños en el intestino, Hashimoto sometió a ratones normales a una dieta pobre en este aminoácido. Los animales, igual que los ratones *Ace2*$^{-/y}$, mostraron una mayor predisposición a la inflamación intestinal, cuando se les administraba la sustancia irritante. Es más, los investigadores descubrieron que, al complementar la dieta de los ratones *Ace2*$^{-/y}$ con una forma de triptófano que se absorbe sin la intervención de B^{0}AT1, se recuperaba su capacidad de resistencia a la inflamación. Cabe destacar que los animales portadores de una mutación que reducía los niveles totales de triptófano en el organismo debido a su pérdida excesiva a través de la orina no eran más sensibles a la sustancia irritante, lo que sugiere que la resistencia a la inflamación depende directamente de la cantidad de este aminoácido en el intestino.

Para entender de qué manera la ausencia de ACE2 afecta al intestino grueso pese a su escasa expresión en este órgano, Hashimoto y sus colaboradores analizaron la función de los péptidos antimicrobianos. Tales moléculas constituyen la primera línea de defensa contra ataques e infecciones. Son segregadas en abundancia por las células epiteliales que tapizan las paredes del intestino y se desplazan por el conducto digestivo para controlar la composición de las comunidades microbianas. Los investigadores comprobaron que tanto los animales sin ACE2 como los sometidos a una dieta pobre en triptófano presentaban niveles bajos de péptidos antimicrobianos en el intestino delgado. Observaron también que las especies microbianas presentes en el intestino grueso de los ratones sin ACE2 eran distintas de las halladas en anima-

les normales, diferencia que se redujo al añadir una fuente de triptófano a la dieta de los primeros. En un experimento concluyente demostraron que, al transferir la microbiota de ratones *Ace2*$^{-/y}$ y de ratones normales a otros sin microbiota propia, aquellos que la recibían de los mutantes *Ace2* eran más sensibles a la inflamación intestinal inducida por productos irritantes que aquellos que la habían recibido de animales normales. Estos resultados indican que el factor que agrava la inflamación es la comunidad microbiana que se establece en el intestino de los ratones con carencia de triptófano.

Algunos aspectos de ese proceso ya habían sido sugeridos antes, pero Hashimoto los ha integrado en una cadena coherente de acontecimientos: desde la mutación genética y la deficiencia nutricional específica, hasta los cambios en la comunidad microbiana intestinal y la susceptibilidad a la inflamación. Este estudio también destaca la dependencia mutua de los distintos factores implicados en el mantenimiento del equilibrio intestinal, como las células epiteliales, el sistema inmunitario y las bacterias residentes.

Quedan por resolver varias preguntas, en particular la relación entre el triptófano y la inflamación. Se ha demostrado que este aminoácido y sus derivados desempeñan una importante función en la respuesta inmunitaria, si bien los mecanismos implicados se conocen tan solo de manera parcial. Por ejemplo, los valores bajos del triptófano y otros aminoácidos son detectados por una vía celular dependiente de la proteína mTOR, una molécula clave en la respuesta inmunitaria debido a su efecto en procesos básicos como el crecimiento celular y la transcripción. Cabe mencionar que en el estudio de Hashimoto se comprobó que la actividad de mTOR se hallaba reducida en el intestino de los ratones deficientes en ACE2.

La metabolización del triptófano por enzimas como la triptófano 2,3-dioxigenasa (TDO) y la indolamina 2,3-dioxigenasa (IDO) puede influir también en la respuesta inmunitaria. Estas enzimas producen compuestos derivados del triptófano, como las quinureninas, que pueden activar el factor de transcripción AhR, que controla la expresión de citocinas (proteínas implicadas en la comunicación intercelular), además de otras moléculas. En algunas células del sistema inmunitario, la activación de AhR induce la secreción de las citocinas IL-22 e IL-17, que estimulan a su vez la producción de péptidos antimicrobianos en las células epiteliales del intestino. Las moléculas activadoras de AhR derivadas de la dieta resultan esenciales para la producción intestinal de IL-22, y el fallo de esta vía de señalización aumenta la predisposición a sufrir daños e inflamación en este órgano. Dadas las similitudes entre los efectos de la deficiencia de AhR y las características de los ratones deficientes en ACE2 de este estudio, podría conjeturarse que la activación de AhR representaría el eslabón que falta por identificar en la relación entre los niveles bajos de triptófano en la dieta y una reducción de la cantidad de péptidos antimicrobianos en el intestino. Sin embargo, no debe olvidarse el posible papel de otros derivados de este aminoácido con actividad inmunitaria, como la serotonina.

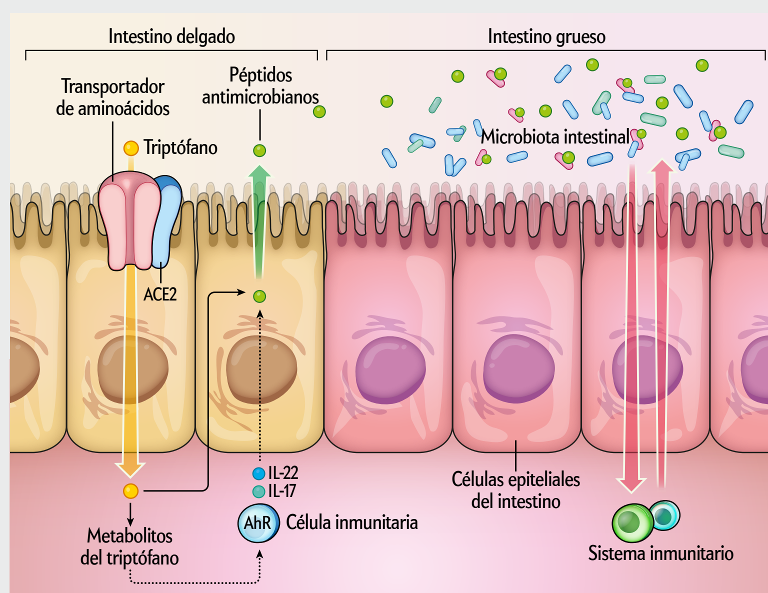
En resumen, Hashimoto y sus colaboradores han demostrado que las interacciones complejas entre la dieta, la dotación genética, la respuesta del huésped y la ecología microbiana del intestino pueden desentrañarse mediante modelos apropiados. Los estudios que analicen esos procesos interrelacionados y el modo en que son regulados resultarán fundamentales para hacer frente a los problemas de salud pública de las regiones pobres, donde siguen muy extendidas la inmunodeficiencia asociada a la desnutrición y las enfermedades infecciosas.

—Ana Izcue
Instituto Max Planck de Inmunología y Epigenética de Friburgo, Alemania
—Fiona Powrie
Dpto. Nuffield de medicina clínica Universidad de Oxford

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 487, págs. 437-439, 2012. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2012

DESNUTRICIÓN E INMUNODEFICIENCIA

El aminoácido triptófano se obtiene de la dieta y es absorbido en el intestino delgado a través de una proteína transportadora de aminoácidos dependiente de la enzima ACE2. Un equipo de investigadores ha demostrado que los ratones que carecen de ACE2 o que reciben una dieta sin triptófano sufren, en respuesta a agresiones, una inflamación más pronunciada en el intestino grueso que los que poseen niveles normales de este aminoácido. Los animales con carencia de triptófano presentan también menos péptidos intestinales antimicrobianos, moléculas producidas por las células epiteliales que se desplazan por el intestino para controlar la comunidad microbiana. Los microbios intestinales cumplen una función clave en la respuesta inmunitaria (*flechas rojas*), y los autores proponen que la microbiota alterada de los ratones con carencia de triptófano es la causa de su propensión a la inflamación. Aún se desconoce si el vínculo entre los bajos niveles de triptófano en el intestino y de péptidos antimicrobianos descrito por los investigadores es directo (*línea continua*) o si se hallan implicados otros tipos celulares (*línea de puntos*). Por ejemplo, el triptófano y sus metabolitos podrían provocar, a través del factor de transcripción AhR, que las células del sistema inmunitario intestinal produzcan las citocinas IL-22 e IL-17, que a su vez estimulan la secreción de péptidos antimicrobianos.



NATURE

COSMOLOGÍA

La dinámica peculiar de los cúmulos de galaxias

Un efecto sutil permite leer nueva información en el fondo cósmico de microondas

El universo se expande desde hace 13.700 millones de años. Sin embargo, no siempre lo ha hecho al mismo ritmo: desde que tenía unos 6000 millones de años de edad esa expansión tiene lugar de forma acelerada, lo cual implica que los cúmulos de galaxias se alejan unos de otros a una velocidad cada vez mayor. El agente responsable es la energía oscura, una enigmática forma de energía que ejerce efectos repulsivos. Aunque desconocemos su naturaleza, hoy sabemos que compone tres cuartas partes de toda la masa y energía presentes en el universo.

Como resultado del juego entre la atracción gravitatoria y la expansión acelerada, las grandes estructuras cósmicas adquieren movimientos peculiares (desplazamientos relativos que se superponen al alejamiento uniforme que imprime la expansión cósmica). Medir ese campo de velocidades peculiares permite deducir información fundamental en cosmología, como la ecuación de estado del universo (que relaciona presión y densidad) o la clase de procesos que participan en el crecimiento y evolución de los cúmulos de galaxias.

El año pasado, producto de una colaboración internacional dirigida por Nick Hand, de la Universidad de California en Berkeley, y en la que participó el autor, descubrimos que los movimientos peculiares de los cúmulos de galaxias se encuentran codificados en el espectro de la radiación del fondo cósmico de microondas (CMB, por sus siglas en inglés). Junto con la detección de una nueva partícula de propiedades compatibles con el bosón de Higgs, el hallazgo fue considerado por la revista *Physics World* como uno de los resultados más importantes en física de 2012.

Desde la gran explosión hasta hoy

Unos 380.000 años después de la gran explosión (cuando el universo solo tenía el 0,003 por ciento de su edad actual), el cosmos se enfrió lo suficiente como para que protones y electrones pudieran unirse y formar átomos neutros, principalmente hidrógeno. La materia neutra no interacciona con los fotones, por lo que dicho proceso liberó una ingente cantidad de radiación que, desde entonces, fluye libremente por el universo. Esa luz, detectada en 1964 por Arno Penzias y Robert Wilson, es la que hoy compone el CMB. Con muy buen grado de aproximación, su espectro actual coincide con el de un cuerpo negro a unos 2,7 grados Kelvin, cuyo máximo de emisión ronda los 160 gigahercios (GHz).

En 1970, los físicos Rashid Sunyáev y Yákov Zeldóvich predijeron que, en su camino hacia la Tierra, los fotones del CMB debían sufrir pequeños cambios en su energía. Dichas fluctuaciones se originarían al interaccionar con los electrones libres del plasma presente en los cúmulos de galaxias, cuyas temperaturas electrónicas alcanzan las decenas de millones de grados Kelvin. Dicho fenómeno, denominado efecto Sunyáev-Zeldóvich (SZ) térmico, implica una leve distorsión del espectro de cuerpo negro del CMB. La frecuencia de la señal resulta independiente de la distancia al objeto y se caracteriza por un decremento en frecuencias cercanas a los 140 GHz, un desplazamiento neto nulo hacia los 210 GHz y un incremento a partir de los 270 GHz.

El efecto SZ térmico ha sido observado en numerosas ocasiones. Sin embargo, si el cúmulo posee una velocidad peculiar, los electrones del plasma ejercerán un efecto adicional sobre los fotones del CMB. Tales correcciones se conocen como efecto SZ cinético y provocan una leve alteración en la radiación del CMB, la cual conserva la forma de su espectro, pero modifica su amplitud de manera proporcional a la velocidad peculiar del cúmulo. Un cúmulo típico alejándose de la Tierra rebajará la temperatura del CMB en torno



En su camino hacia la Tierra, los fotones del fondo cósmico de microondas (CMB, *arriba*) ven modificada su energía al interaccionar con los electrones del plasma caliente de los cúmulos de galaxias. Si un cúmulo se aleja de nuestro planeta (*izquierda*), la longitud de onda de los fotones del CMB experimentará un ligero desplazamiento hacia el rojo (menor energía). Si el cúmulo se aleja (*derecha*) se observará el efecto contrario. Observaciones recientes realizadas con el Telescopio Cosmológico de Atacama (*debajo*), en Chile, han permitido medir por primera vez este efecto.

SUDEEP DAS Y DAVID SPERGEL, UNIVERSIDAD DE PRINCETON

a una millonésima de grado. Un cúmulo que se acerque a nuestro planeta causará el efecto contrario.

La intensidad del efecto SZ cinético resulta un orden de magnitud menor que la del térmico, motivo por el que nunca había sido observado con anterioridad. Su detección fue posible gracias a un análisis estadístico de las observaciones realizadas con el Telescopio Cosmológico de Atacama y los datos del catálogo de galaxias BOSS del Sondeo Digital del Cielo Sloan.

Estadística cósmica

El Telescopio Cosmológico de Atacama se ubica en la segunda región de Chile. Fue diseñado para detectar la radiación de fondo en tres frecuencias: 148, 218 y 270 GHz. Estas coinciden con las bandas propias del efecto SZ térmico, lo que permite medir las fluctuaciones correspondientes. Sus objetivos científicos incluyen el análisis del espectro de potencias del CMB y de la distribución de materia en el universo, la determinación de los parámetros cosmológicos, el estudio de los cúmulos de galaxias, el efecto de lente gravitacional sobre las fluctuaciones del CMB y la naturaleza de fuentes puntuales extragalácticas.

Nuestro trabajo se efectuó sobre una región del cielo que cubría 330 grados cuadrados en el ecuador celeste. Para determinar las fluctuaciones de temperatura del CMB, comprendidas entre 15 y 25 microkelvin, se usó la banda de 148 GHz del Telescopio Cosmológico de Atacama con una resolución de 1,4 minutos de arco. Por otro lado, las galaxias rojas luminosas del catálogo BOSS permitieron trazar los cúmulos de galaxias.

Dado que el efecto SZ cinético resulta muy difícil de detectar en cúmulos individuales, nuestro estudio abordó el problema de manera estadística. La técnica consiste en estudiar la señal en pares de cúmulos cercanos que experimentan una atracción mutua. El más alejado «cae» sobre el más próximo, por lo que el primero parece acercarse al observador, mientras que el segundo se aleja.

La diferencia entre los momentos lineales de cada cúmulo resulta tanto menor cuanto más distantes se encuentran estos. A partir de las fluctuaciones de temperatura del CMB, el efecto SZ cinético provee una herramienta para medir la componente del momento a lo largo de la línea de visión. Cualquier otra señal en la banda de microondas asociada a cúmulos de galaxias individuales, como el efecto SZ térmico, se anula.

Los resultados se muestran compatibles con los modelos de formación de estructuras que predicen que los pares de cúmulos deben experimentar una pequeña tendencia a acercarse, en lugar de alejarse. Las mediciones del momento medio en parejas de cúmulos efectuadas en este trabajo representan el paso inicial para constreñir el colapso y el crecimiento de las grandes estructuras cósmicas, así como para poner límites a la energía oscura, las posibles modificaciones de la gravedad, o ambas.

—Leopoldo Infante
Dpto. de astronomía y astrofísica
Pontificia Universidad Católica de Chile

MICROBIOLOGÍA

Vencer la resistencia a los antibióticos

El conocimiento profundo de la percepción de quórum, un sistema de comunicación peculiar en las colonias bacterianas, augura avances en la lucha contra las resistencias

Desde 1940, en que Edward P. Abraham y Ernst B. Chain describieron la primera resistencia a la meticilina en *Staphylococcus*, hasta hoy en día se han descrito diversos mecanismos de resistencia a múltiples antibióticos. Si se tiene en cuenta que muchos de esos fármacos se han obtenido a partir de hongos (como *Penicillium* spp.) que se hallan en condiciones normales en la naturaleza, no resulta extraño que desde el principio de la era de los antibióticos empezara a la vez la era de la resistencia a ellos.

En sus inicios, el problema de la resistencia se hallaba focalizado en el entorno hospitalario. Pero debido a diversas causas, como el no lavado de las manos tras el contacto hospitalario o el abuso de an-

educación ciencia filosofía universidad opinión comunicación historia ética cuestionar observar conocimiento reflexión 2.0 blog experimento investigación diálogo

SciLogs
Ciencia en primera persona

Carmen Agustín Pavón
Neurobiología

Claudi Mans Teixidó
Ciencia de la vida cotidiana

José María Eirín López
Evolución molecular

Marc Furió Bruno
Los fósiles hablan

Ángel Garcimartín Montero
Física y sociedad

Pablo González Cámara y Fernando Marchesano
Física de altas energías

Luis Cardona Pascual
Ciencia marina

Yvonne Buchholz
Psicología y neurociencia al día

Y más...

www.investigacionyciencia.es/blogs

tibióticos en la agricultura y la ganadería, hoy en día los patógenos multirresistentes se han convertido en un problema comunitario. Ello conlleva enormes pérdidas económicas, además de humanas.

La resistencia se basa en diversos mecanismos. Las bacterias patógenas producen enzimas que destruyen el antibiótico, disminuyen la permeabilidad de la membrana (con lo que dificultan la entrada del fármaco), cuentan con bombas de expulsión que extraen activamente el antibiótico fuera de la célula o bien alteran la diana de acción del antibiótico (cambian la estructura de cierta proteína contra la que va dirigida el medicamento). Tales mecanismos están codificados por genes que se hallan bien en el cromosoma de la bacteria o bien en plásmidos, segmentos de ADN circular extracromosómico que se transfieren de una bacteria a otra y se diseminan así en la población. Los plásmidos permiten que los mecanismos de resistencia sean transmisibles, lo que hace aumentar de forma exponencial la supervivencia de las bacterias como ya comprobaron la autora y otros en 2007 en un artículo publicado en la revista *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*.

De una forma u otra, los genes responsables de la resistencia a los antibióticos se activan y las infecciones dejan de reaccionar a los tratamientos. Pero ¿cómo saben las bacterias cuál es el momento indicado para activar esos genes?

La comunicación entre bacterias

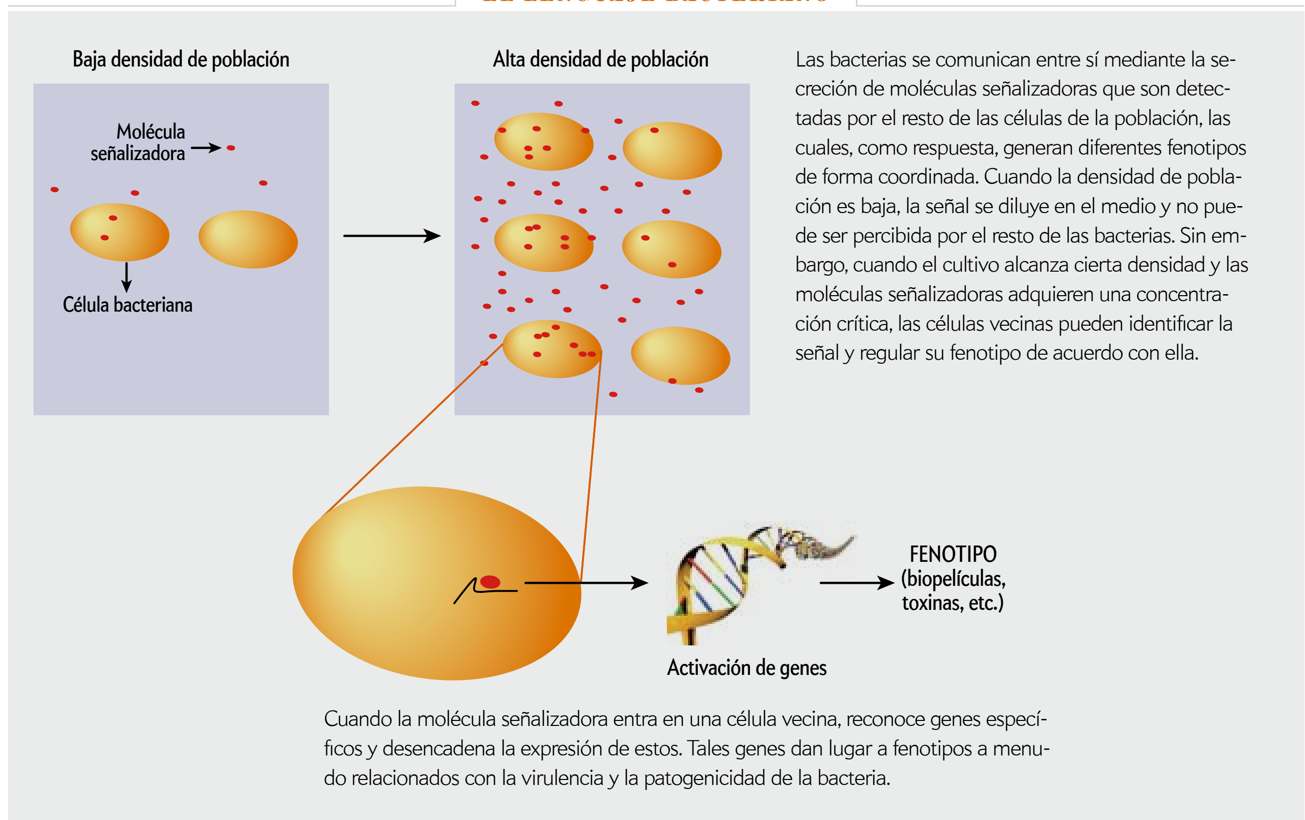
Cabe introducir aquí el concepto de «percepción de quórum» (*quorum sensing*), que se podría definir como el lenguaje bacteriano. Se trata de un mecanismo empleado por las poblaciones microbianas para poder comunicarse unas células con otras, con el objetivo de generar diferentes fenotipos de una forma coordinada. Tal lenguaje está basado en la secreción de ciertas sustancias al exterior. Estas son identificadas por el resto de las bacterias de la población que, como consecuencia, modifican su comportamiento.

El mecanismo de acción de la percepción de quórum es el siguiente: las bacterias producen ciertas moléculas señalizadoras (conocidas también como autoinductoras o feromonas) que son exportadas al medio externo; mientras la población bacteriana no alcanza cierta densidad, la cantidad de esas moléculas resulta insuficiente para ser detectada por las células vecinas o producir un efecto en ellas. Pero a medida que la población bacteriana va creciendo, las señales se van incrementando y acumulando en el medio. Al llegar a una determinada densidad de población, las moléculas alcanzan un valor crítico a partir del cual pueden ser reconocidas por el resto de las bacterias. De este modo se coordina la expresión de ciertos genes que, a su vez, pueden inducir ciertos fenotipos, tales como la producción de biopelículas o toxinas.

Ese fenómeno no solo se emplea en la comunicación de una especie bacteriana consigo misma, sino también entre distintas especies, como veremos más adelante.

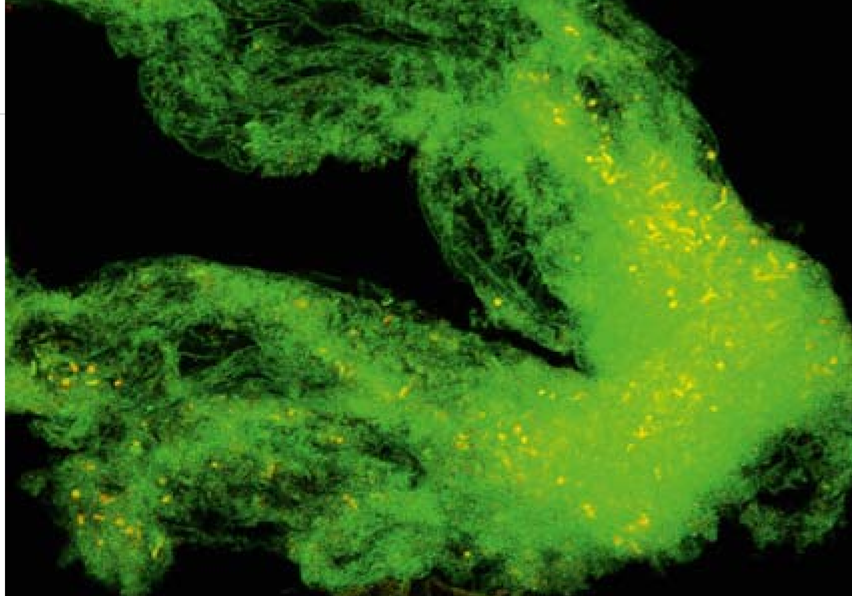
Una de las bacterias patógenas en que se ha demostrado la percepción de quórum y que causa hoy en día más problemas en diferentes aspectos de la medicina es *Pseudomonas aeruginosa*. Este microorganismo constituye un grave problema en los pacientes con fibrosis quística (una enfermedad hereditaria que ocasiona alteraciones en las secreciones mucosas). Invade los pulmones y se adhiere a las células, inicia la formación de biopelículas y establece una infección crónica en los pulmones del paciente. Otra razón para destacar esta bacteria es que se ha convertido en uno de los principales patógenos de adquisición nosocomial, especialmente en pacientes inmunodeprimidos. Además, en varias ocasiones se han descrito brotes debidos a cepas de *P. aeruginosa* con resistencia múltiple a antibióticos.

EL LENGUAJE BACTERIANO



Las bacterias se comunican entre sí mediante la secreción de moléculas señalizadoras que son detectadas por el resto de las células de la población, las cuales, como respuesta, generan diferentes fenotipos de forma coordinada. Cuando la densidad de población es baja, la señal se diluye en el medio y no puede ser percibida por el resto de las bacterias. Sin embargo, cuando el cultivo alcanza cierta densidad y las moléculas señalizadoras adquieren una concentración crítica, las células vecinas pueden identificar la señal y regular su fenotipo de acuerdo con ella.

Cuando la molécula señalizadora entra en una célula vecina, reconoce genes específicos y desencadena la expresión de estos. Tales genes dan lugar a fenotipos a menudo relacionados con la virulencia y la patogenicidad de la bacteria.



MÓNICA CARTELLE GESTAL

Biopelícula de la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* **desarrollada en cultivo líquido en medio mínimo después de incubarla a 37 grados centígrados durante tres días. (Imagen obtenida mediante microscopía confocal.)**

P. aeruginosa emplea la percepción de quórum para organizar y regular numerosos comportamientos, como la formación de biopelículas, la movilidad, la producción de exopolisacáridos o la agregación celular, todos ellos directamente relacionados con la virulencia y la patogenicidad del microorganismo. *Pseudomonas* posee dos sistemas principales de percepción de quórum que interaccionan entre sí para regular todo el comportamiento de la población bacteriana.

Una sociedad organizada

La percepción del quórum tiene dos consecuencias principales. Por un lado, regula diferentes comportamientos que promueven la cooperación, como la síntesis de productos extracelulares que proporcionan un beneficio local a la población. Por otro, hace aumentar la síntesis de las propias moléculas de percepción de quórum, con lo que se produce la autoinducción.

El funcionamiento de la colonia se basa en que los individuos de la población cooperan de una manera honesta y coordinada. Sin embargo, puede darse el caso de que existan individuos «tramposos». Son aquellos que se sirven de las señales del resto de la población, pero se ahorran el coste de producirlas, con lo que nunca pierden. Tales individuos suelen hallarse entremezclados con las bacterias que producen las señales. En el momento en que estas comienzan a hacerlo, disminuyen su crecimiento porque la producción de la señal les supone un gasto energético. Tal situación es aprovechada por los tramposos, que empiezan a proliferar de forma exponencial, pues usan las moléculas señalizadoras pero no gastan energía en la síntesis de estas.

La combinación de cooperación y engaño en la comunicación bacteriana se mantiene en la evolución gracias a lo que se conoce como «selección de parentesco» (*kin selection*), el cambio en las frecuencias génicas a lo largo de las generaciones que surge a raíz de las interacciones entre individuos emparentados. De este modo, una alta relación genética permite a las bacterias cooperar e interactuar entre ellas, lo que conlleva una mayor virulencia, mientras que una baja relación genética permite a los tramposos explotar al resto de la población y obtener beneficio de ella. Las bacterias se benefician así de la comunicación honesta predominante, que garantiza la cooperación entre ellas, pero en poblaciones mixtas pueden existir «tramposos» que, cuando tienen la ocasión, se aprovechan de sus vecinos para crecer y propagarse.

¿Existe un lenguaje universal?

La percepción de quórum no solo puede modificar el comportamiento de las bacterias vecinas, sino que también facilita la comunicación cruzada con las hormonas del huésped, de modo que estas pueden regular la expresión de algunos genes bacterianos. Ello significa que existe una comunicación universal o comunicación entre reinos.

El sistema digestivo humano contiene entre 500 y 1000 especies bacterianas, lo que proporciona un beneficio mutuo: las bacterias consiguen un hábitat idóneo que les proporciona nutrientes constantemente, y los humanos nos servimos de las bacterias para mejorar la digestión y la absorción de nutrientes. La composición de la microbiota intestinal puede variar en función de factores genéticos, ambientales o los hábitos alimentarios del huésped [*véase* «El ecosistema microbiano humano», por J. Ackerman; Investigación y Ciencia, agosto de 2012].

Los microorganismos nos proporcionan asimismo una barrera de defensa, al impedir que las bacterias patógenas se adhieran a nuestro aparato digestivo o lo colonicen; además, segregan diversas sustancias antimicrobianas que destruyen los posibles patógenos invasores. Tales reacciones se producen gracias a la comunicación entre bacterias y huésped, regulada principalmente por moléculas autoinductoras (procedentes de las bacterias comensales) y por hormonas del huésped (como la epinefrina y la norepinefrina). Se ha observado que las alteraciones en esta comunicación dan lugar a la aparición de infecciones.

Aplicación terapéutica

Actualmente se están desarrollando nuevas alternativas terapéuticas frente al incremento de la resistencia a los antibióticos. Entre los nuevos campos de estudio cabe mencionar los que se centran en el posible uso de bacteriófagos, bacteriocinas (toxinas proteicas) o péptidos, pero hacen falta más investigaciones para su aplicación.

Desde hace algunos años se están ensayando estrategias basadas en moléculas que inhiban la percepción de quórum. La idea consiste en impedir la comunicación entre las bacterias con el fin de desestructurar la comunidad y eliminar así su virulencia y patogenicidad. La ventaja de tal estrategia reside en la escasa probabilidad de que el microorganismo desarrolle una resistencia ante ella. En la actualidad, diversas compañías farmacéuticas y universidades, como la de Nottingham, están colaborando para crear este tipo de tratamiento.

Tras el auge de la era antibiótica, la era de la lucha contra las resistencias ha cobrado especial importancia. El descubrimiento de la percepción de quórum ha dado pie a una nueva etapa que permite augurar avances importantes en los tratamientos antibióticos. Pensar en las bacterias como comunidades y sociedades que pueden cooperar y evolucionar en un fenotipo más resistente, y comprender tal comunicación para poder controlarla, son algunos de los nuevos objetivos de la microbiología.

—Mónica Cartelle Gestal
Centro de Ciencias Biomoleculares
Universidad de Nottingham



EVOLUCIÓN HUMANA

LOS ORÍGENES DE LA CREATIVIDAD

Nuevas pruebas del ingenio de nuestros antepasados obligan a reconsiderar el momento en que estos empezaron a pensar con inventiva

Heather Pringle

EN SÍNTESIS

Durante mucho tiempo se ha pensado que la creatividad de los humanos primitivos apenas se manifestó hasta hace 40.000 años, cuando su capacidad para la innovación pareció dispararse.

Pero algunos descubrimientos arqueológicos realizados en los últimos años han demostrado que nuestros ancestros tuvieron destellos de brillantez anteriores a esa fecha.

Tales hallazgos indican que la capacidad humana para la innovación se desarrolló a lo largo de cientos de miles de años gracias a diferentes factores biológicos y sociales.

Heather Pringle es escritora científica y directora editorial de la revista *Archaeology*.



Sin firma ni fecha, el número de inventario 779 cuelga detrás de un grueso cristal en la iluminada Sala de los Estados del Louvre. Excepto los martes, en que el museo está cerrado, todas las mañanas poco después de las nueve, parisinos, turistas, amantes del arte y curiosos empiezan a desfilar por la sala. Sus murmullos se mezclan como el zumbido de un enjambre, algunos estiran el cuello para ver mejor y otros alzan los brazos fugazmente para tomar fotos con el móvil. Pero la mayoría se inclina hacia delante y una mirada de asombro ilumina su rostro mientras contemplan una de las creaciones más famosas de la humanidad: la *Mona Lisa* de Leonardo da Vinci.

Realizada a principios del siglo xvi, la obra posee una belleza misteriosa y mística que ningún otro retrato anterior había sabido recoger. Para pintar el cuadro, Leonardo, quien en una ocasión escribió que le hubiera gustado «hacer milagros», empleó una nueva técnica artística que él denominó *sfumato*, o difuminado. Durante varios años aplicó, tal vez con la delicada punta de su dedo, diferentes capas de pintura muy finas y translúcidas, algunas no más gruesas que un glóbulo rojo de la sangre. A medida que superponía unas 30 capas, una detrás de otra, Leonardo fue suavizando las líneas y las gradaciones de colores hasta que la escena pareció quedar detrás de un velo de humo.

Sin duda, la *Mona Lisa* es obra de un genio de la invención, una creación que se sitúa al lado de la música de Mozart, las joyas de Fabergé, la coreografía de Martha Graham y otros grandes clásicos. Pero estas obras famosas constituyen solo manifestaciones magníficas de un rasgo que durante largo tiempo ha formado parte de nuestro acervo: la capacidad de crear algo nuevo y beneficioso, el don de mejorar continuamente los diseños y las técnicas, desde los últimos coches sin emisiones de Japón hasta las elegantes naves espaciales en las plataformas de lanzamiento de la NASA. Para Christopher Henshilwood, arqueólogo de la Universidad de Witwatersrand en Johannesburgo, los humanos actuales somos inventores distinguidos que avanzamos y experimentamos con la tecnología de forma constante.

El modo en que hemos adquirido esa capacidad de crear en apariencia infinita es objeto de intensas investigaciones. No siempre hemos tenido tal vorágine de creatividad. La línea evolutiva humana se originó en África hace unos 6 millones de años, pero durante casi 3,4 millones de años los primeros miembros de nuestra familia no dejaron un registro visible de su capacidad de invención. Probablemente obtenían sus alimentos vegetales y animales utilizando sus manos o mediante palos de cavar rudimentarios que no se han conservado. En algún momento, esos homininos nómadas empezaron a golpear cantos de río con otras piedras para producir lascas con filos de corte. Se trató de un acto de un ingenio asombroso, sin duda, pero después hubo un período largo con escasos avances. Parece que durante 1,6 millones de años nuestros ancestros no cambiaron la forma de tallar las hachas de mano multifuncionales y solo hubo pequeñas modificaciones en el diseño. Según Sally McBrearty, arqueóloga de la Universidad de Connecticut, se trata de herramientas muy estereotipadas.

Entonces, ¿cuándo empezó la mente humana a agitarse con nuevas ideas técnicas y artísticas? Hasta hace poco, la mayoría de los investigadores señalaban el inicio del Paleolítico superior, hace 40.000 años, como el momento en que *Homo sapiens* empezó una repentina y extraordinaria carrera de invenciones en Europa: collares elaborados con conchas, pinturas rupestres de uros y otros animales en las paredes de las cuevas y la talla de una gran variedad de instrumentos líticos y de hueso. Esos hallazgos dieron lugar a la idea extendida de que una mutación genética habría originado un salto en la capacidad cognitiva de los humanos y habría provocado una «gran explosión» de creatividad.

Sin embargo, los nuevos datos ponen en entredicho tal teoría. Durante la última década, los arqueólogos han descubierto indicios mucho más antiguos de manifestaciones artísticas y de técnicas avanzadas que indican que la capacidad humana de innovación se desarrolló mucho antes de lo que se pensaba, incluso antes de la aparición de *Homo sapiens*, hace 200.000 años. Pero aunque la capacidad de crear surgió muy pronto, se mantuvo latente durante milenios hasta que prendió en nuestra especie a lo largo de África y Europa. Las pruebas señalan que nuestro poder para la innovación no emergió de repente en nuestra historia evolutiva, sino que se fue gestando durante cientos de miles de años gracias a una compleja mezcla de factores biológicos y sociales.

Pero ¿en qué momento exacto empezó la humanidad a pensar fuera de los marcos establecidos y qué causas espolearon finalmente nuestra brillante creatividad? Entender esas circunstancias exige una investigación detectivesca basada en muchos tipos de pistas, entre ellas, la que demuestra que las raíces biológicas de la creatividad resultan mucho más antiguas de lo que se suponía.

LAS RAÍCES DE LA INVENCIÓN

Desde hace tiempo los arqueólogos han considerado el empleo de símbolos como el indicador más importante de una cognición humana moderna, en gran parte porque demuestra la ca-

PÁGINAS ANTERIORES: ILUSTRACIÓN DE DAVID PALUMBO

Desarrollo del ingenio

De forma sorprendente, los ejemplos más antiguos de inventiva artística y técnica indican que la creatividad humana se gestó a lo largo de cientos de miles de años hasta alcanzar su apogeo hace entre 60.000 y 90.000 años en África y hace 40.000 años en Europa. Causas sociales, como el aumento de la población, parecen haber acentuado el poder de innovación de nuestros antepasados. Por un lado, estas aumentarían la probabilidad de que alguien del grupo descubriese una innovación técnica y, por otro lado, fomentarían las relaciones entre grupos que intercambiaban ideas. La representación cronológica ilustra los primeros indicios de inventos fundamentales que llevaron al punto álgido en la evolución cultural.

Hace 3,4 millones de años
Huesos de animales con marcas de corte en Dikika, Etiopía

Hace 2,6 millones de años
Lascas de piedra de Gona, Etiopía

Hace 1,76 millones de años
Instrumentos de piedra bifaciales de Turkana, Kenia



Hace 1 millón de años
Huesos quemados y materiales vegetales que indican el control del fuego en la cueva de Wonderwerk, Sudáfrica



Hace 500.000 años
Puntas líticas que debieron estar fijadas a mangos de madera, un indicio de instrumentos complejos en Kathu Pan 1, Sudáfrica

Hace 164.000 años
Instrumentos líticos tratados térmicamente de Pinnacle Point, Sudáfrica

Hace entre 75.000 y 100.000 años
Fragmento de ocre, u óxido de hierro, grabado en la cueva de Blombos, Sudáfrica



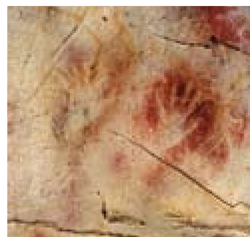
Hace 77.000 años
Camas con repelentes de insectos en la cueva Sibudu, Sudáfrica



Hace 71.000 años
Puntas de proyectil de Pinnacle Point, Sudáfrica



Hace entre 42.000 y 43.000 años
Instrumentos musicales (flautas) en la cueva de Geissenklösterle, Alemania



Hace entre 37.000 y 41.000 años
Pinturas rupestres de El Castillo, España

Hace entre 35.000 y 40.000 años
Arte figurativo de Hohle Fels, Alemania



Hace entre 30.000 y 40.000 años
Agujas de coser de Kostenki, Rusia

EN ORDEN CRONOLÓGICO: CORTESÍA DE P. J. TEXIER. COPYRIGHT © MPK/WTAP; CORTESÍA DE JAYNE WILKINS, UNIVERSIDAD DE TORONTO; CORTESÍA DE TOVE RUTH SMITH Y SIMEN OESTMO; CORTESÍA DE CHRISTOPHER HENSHILWOOD, UNIVERSIDAD WITS; CORTESÍA DE UNIVERSIDAD DE TUBINGA; CORTESÍA DE PEDRO SAURA, UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID; CORTESÍA DE H. JENSEN, COPYRIGHT © UNIVERSIDAD DE TUBINGA



CORTESÍA DE LA UNIVERSIDAD DE THE WITWATERSRAND, JOHANNESBURGO

pacidad para el lenguaje, un rasgo distintivo de los humanos. Así, una impresionante cueva con arte rupestre del Paleolítico superior señala, sin duda, la presencia de personas que pensaban como nosotros. Pero en tiempo reciente los expertos han empezado a buscar en el registro arqueológico pruebas de otros comportamientos modernos, y de sus precedentes, y han descubierto datos fascinantes.

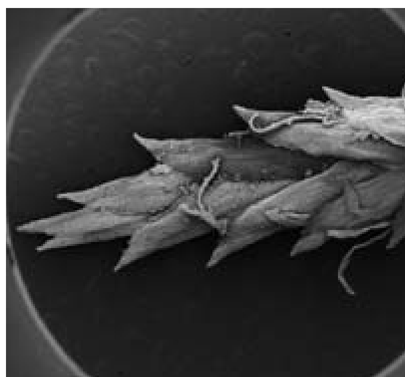
La arqueóloga Lyn Wadley, de la Universidad de Witwatersrand, ha dedicado gran parte de su carrera a estudiar la cognición en el pasado, unas investigaciones que la llevaron en los años noventa del siglo xx a iniciar excavaciones en la cueva Sibudu, a unos 40 kilómetros al norte de Durban (Sudáfrica). Hace dos años descubrió con su equipo una extraña capa de un material vegetal de color blanco y fibroso. Parecían los restos de antiguas camas formadas por esteras y otras plantas que aquellas gentes distribuirían por el suelo para sentarse o dormir. Pero ese manto pudo también formarse por el arrastre y acumulación de hojarasca llevada por el viento. El único modo de averiguarlo consistía en extraer la capa entera en un bloque de escayola y llevarla al laboratorio. «Nos llevó tres semanas envolverla con escayola», recuerda Wadley, «y todo ese tiempo estuve de bastante malhumor; me preguntaba si estaba desperdiciando tres semanas de trabajo de campo».

Pero la apuesta de Wadley tuvo una enorme recompensa. En diciembre de 2011, ella y su equipo publicaron en *Science* que los antiguos pobladores de Sibudu habían seleccionado las hojas de un solo tipo de árbol, de los muchos disponibles en la zona, para elaborar sus lechos hace 77.000 años, unos 50.000 años antes de lo que apuntan otros casos descritos previamente. Lo que más sorprendió a Wadley fue el conocimiento profundo que poseían esos habitantes acerca de la vegetación local. Los análisis revelaron que las hojas escogidas pertenecían a *Cryptocarya woodii*, un árbol con compuestos insecticidas y larvicidas que repelen los mosquitos que hoy transmiten enfermedades. Wadley destaca la importancia de disponer de ese recurso para dormir, sobre todo cuando se vive cerca de un río.

Sin embargo, la creatividad de Sibudu no acaba aquí. Sus moradores tal vez idearon trampas para capturar pequeños antílopes, cuyos restos están repartidos por todo el yacimiento. También debieron de confeccionar arcos y flechas para cazar presas más difíciles, a juzgar por el tamaño, la forma y las marcas de uso de unas puntas de piedra halladas en la cueva. Además, prepararon nuevos compuestos químicos muy útiles. Al analizar el residuo oscuro presente en algunas puntas de flecha mediante un haz de alta energía, el equipo de Wadley detectó que habían utilizado pegamentos de diversas sustancias para enganchar las puntas a mangos de madera. Los investigadores reprodujeron experimentalmente los adhesivos mezclando partículas de ocre de diferentes tamaños con resinas vegetales y calen-







Sabiduría antigua: La meticulosa excavación de la cueva Sibudu en Sudáfrica (*izquierda*) ha proporcionado indicios de que, hace 77.000 años, sus pobladores hacían los lechos (*arriba, derecha*) con plantas repelentes de insectos (*imagen inferior derecha*), unos 50.000 años antes de lo que apuntaban los primeros ejemplos descritos de esa técnica.

tando la mezcla con fuego. Cuando publicaron sus resultados en *Science*, el equipo concluyó que hace 70.000 años los habitantes de Sibudu poseían conocimientos de química, alquimia y técnicas del fuego.

En otros lugares del sur de África se han hallado más pruebas de otros inventos antiguos. Los cazadores recolectores que habitaron la cueva de Blombos hace entre 72.000 y 100.000 años grabaron diseños en fragmentos de ocre; construían punzones de hueso, quizá para confeccionar trajes con pieles; se adornaban con collares brillantes de conchas de caracol, y crearon un estudio de artista al moler ocre rojo y guardarlo en el primer contenedor que conocemos, realizado con conchas de abulón. Más al oeste, en el yacimiento de Pinnacle Point, los pobladores de hace 164.000 años descubrieron que mediante el fuego podían transformar una roca silícea local en un material más lustroso que se tallaba mejor [*véase* «Cuando el mar salvó a la humanidad», por C.W. Marean; Investigación y Ciencia, octubre de 2010]. «Estamos documentando comportamientos que no imaginábamos hace diez años», destaca Henshilwood.

Por otra parte, la capacidad técnica no era exclusiva de los humanos modernos; otros homininos exhibían también rasgos de creatividad. En el norte de Italia, un equipo dirigido por Paul Peter Anthony Mazza, de la Universidad de Florencia, descubrió que nuestros parientes próximos, los neandertales, que aparecieron en Europa hace 300.000 años, mezclaban un tipo de alquitrán con corteza de abedul para fijar lascas de piedra a piezas de madera; confeccionaban así instrumentos enmangados hace 200.000 años. Del mismo modo, en un estudio publicado en *Science* el pasado noviembre se afirmaba que unas puntas líticas halladas en el yacimiento de Kathu Pan 1, en Sudáfrica, constituyeron el extremo letal de unas lanzas de 500.000 años de antigüedad, supuestamente pertenecientes a *Homo heidelbergensis*, el último antepasado común de los neandertales y de *H. sapiens*. Por último, en la cueva Wonderwerk, en Sudáfrica, un estrato con restos de cenizas de plantas y pequeños fragmentos de huesos quemados demuestra que un hominino aún más arcaico, *Homo erectus*, aprendió a utilizar el fuego para calentarse y protegerse de los depredadores hace un millón de años.

Incluso nuestros antepasados más remotos acuñaban en ocasiones nuevas ideas. En dos yacimientos cerca del río Kada Gona, en Etiopía, el equipo liderado por Sileshi Semaw, de la Universidad de Indiana en Bloomington, recuperó las industrias líticas más antiguas: cantos tallados hace 2,6 millones de años por *Australopithecus garhi* u otra especie contemporánea, utilizados para cortar la carne de animales muertos. Ese tipo de instrumentos pueden parecernos rudimentarios si los comparamos con los teléfonos inteligentes, ordenadores portátiles o tabletas actuales. «Pero cuando el mundo estaba formado solo

por objetos modelados por la naturaleza, la capacidad de imaginar algo y hacerlo real debió de parecer algo mágico», afirman Liane Gabora, de la Universidad de Columbia Británica, y el psicólogo Scott Kaufman, ahora en la Universidad de Nueva York, en un capítulo del libro *The Cambridge handbook of creativity* (Cambridge University Press, 2010).

COGNICIÓN Y CREACIÓN

Por mucho que sorprendan esos primeros destellos de creatividad, la gran disparidad entre los humanos actuales y nuestros antepasados en cuanto a la profundidad y amplitud de las innovaciones exige una explicación. ¿Qué cambios se produjeron en el cerebro para diferenciarnos tanto de nuestros ancestros? Gracias al estudio de escáneres tridimensionales obtenidos del endocráneo de homininos arcaicos y al análisis del cerebro de nuestros parientes más próximos, los chimpancés y los bonobos (su línea evolutiva se separó de la nuestra hace 6 millones de años), se está empezando a resolver este enigma. Los datos indican la profunda transformación de nuestra materia gris a lo largo del tiempo.

Se puede decir que la selección natural ha favorecido un cerebro de gran tamaño en los humanos. Mientras que los australopitecinos tenían una capacidad craneal de unos 450 centímetros cúbicos, semejante a la de los chimpancés, *H. erectus* casi doblaba esa cifra hace 1,6 millones de años, con una media de 930 centímetros cúbicos. Y, hace 100.000 años, *Homo sapiens* poseía una capacidad media de unos 1330 centímetros cúbicos. En ese mayor volumen cerebral, un número aproximado de 100 mil millones de neuronas procesan la información y la transmiten a lo largo de 165.000 kilómetros de fibras nerviosas envueltas de mielina, en un sistema con unos 150 billones de sinapsis. Dean Falk, de la Universidad estatal de Florida, afirma que, cuando se busca en el registro arqueológico con qué se relaciona ese hecho, se pone de manifiesto una asociación entre el tamaño cerebral y la tecnología o las capacidades intelectuales.

Pero no solo cambió el volumen craneal a lo largo del tiempo. En la Universidad de California de San Diego, la antropóloga física Katerina Semendeferi ha estudiado una parte del cerebro que parece coordinar los pensamientos y las acciones en la toma de decisiones, la corteza prefrontal. Tras examinar esa región en humanos actuales, chimpancés y bonobos, Semendeferi y sus colaboradores descubrieron que varias áreas importantes de ella se habían reorganizado durante la evolución de los homininos. Así, el área 10 de Brodmann, que está implicada en la consecución de los planes y la organización de la información sensorial, se había duplicado en tamaño después de que los chimpancés y bonobos se separasen de la línea evolutiva humana. Además, el espacio horizontal entre las neuronas de esta área se había ensanchado un 50 por ciento, lo que había creado más espacio para los axones y las dendritas. Según Falk, ello habría originado conexiones más complicadas y remotas, con lo que se obtendrían comunicaciones más complejas y directas entre las neuronas.

«No solo importa lo inteligente que uno es, sino también lo bien conectado que está»
—MARK THOMAS,
Colegio Universitario de Londres

Averiguar la forma en que un cerebro más grande y organizado pudo haber estimulado la creatividad constituye una tarea delicada. Pero Gabora cree que los estudios psicológicos de personas creativas actuales pueden proporcionar algunas claves. Según ella, esos individuos parecen estar en las nubes. Cuando se enfrentan a un problema dejan que su mente divague y permiten que sus recuerdos o pensamientos se evoquen entre ellos. Esa asociación libre estimula las analogías y da lugar a ideas novedosas. Entonces, cuando esas personas tienen una idea imprecisa de la solución, cambian a un pensamiento de tipo más analítico. Centran su atención en las propiedades más relevantes y empiezan a limar una idea para que resulte factible.

Según Gabora, un cerebro más grande conllevaría, sin duda, una mayor capacidad de asociación de ideas. Los miles de millones de neuronas pudieron procesar muchos más estímulos. Un número mayor de ellas participarían en la codificación de un episodio en particular, lo que permitiría memorizar más detalles y establecer más relaciones entre los diferentes estímulos. Imaginemos un hominino que roza un arbusto y una espina araña su piel. Un australopitecino codificaría este suceso de una forma simple: como una pequeña herida que asociaría como rasgo identitario del arbusto. En cambio, un *Homo erectus*, con un mayor número de neuronas, codificaría muchos más detalles del episodio, entre ellos la forma de las espinas y el aspecto de su herida. Así, cuando este hominino empezó a cazar, ante la necesidad de abatir una presa, pudo acudir a las zonas de su memoria que almacenaban el desgarro de la piel y recordar que este fue provocado por las puntas de las espinas. Ello le podría inspirar la idea de un arma: una lanza afilada en su extremo.

Pero los homininos de cerebro grande no podían detenerse demasiado tiempo en esa situación asociativa en la que un suceso hace recordar otros hechos, sean estos importantes o intrascendentes. Su supervivencia dependía de su pensamiento analítico, el modo por defecto. Nuestros ancestros debieron desarrollar, pues, una forma de cambiar de un tipo de pensamiento a otro mediante una ligera modificación de las concentraciones de dopamina y otros neurotransmisores. Gabora plantea que *H. sapiens* necesitaría decenas de miles de años para afinar ese mecanismo antes de poder sacar provecho de la creatividad de su gran cerebro, hipótesis que ella y sus estudiantes están comprobando mediante el empleo de redes neuronales artificiales. A través de un modelo generado por ordenador han simulado la capacidad del cerebro de cambiar entre el pensamiento asociativo y el analítico. Intentan comprender cómo el cambio ayudó a romper nuestras barreras cognitivas y permitió que viéramos las cosas de otra forma. «No es suficiente con tener más neuronas», afirma Gabora, «se ha de poder utilizar la masa cerebral adicional». Una vez adquirida esa última pieza del repertorio biológico, quizás hace algo más de 100.000 años, la mente de nuestros antepasados se mantuvo latente a la espera de situaciones sociales que permitieran su expansión.

CRECER EN LA BRILLANTEZ

En otoño de 1987, Christophe y Hedwig Boesche, de la Universidad de Zúrich, observaron un comportamiento nuevo en un grupo de chimpancés que buscaban comida en el Parque Nacional Tai, en Costa de Marfil. Una hembra se detuvo cerca de un nido de una especie de hormiga legionaria y agarró una pequeña rama. Introdujo uno de sus extremos en la tierra poco compacta de la entrada del hormiguero y esperó a que las hormigas soldado de la colonia lo atacasen. Cuando los insectos hubieron cubierto unos diez centímetros de la rama, la chimpancé la retiró del nido y, con mano diestra, arrastró las hormigas del vástago hacia su boca. Repitió el proceso varias veces hasta quedarse saciada.

Los chimpancés son hábiles en el uso de diferentes tipos de herramientas: cascar nueces con piedras, absorber el agua de los agujeros de los árboles mediante hojas y extraer las raíces nutritivas de las plantas con palos de cavar. Pero parece que no pueden ir más allá de esos conocimientos ni elaborar técnicas más avanzadas. Según Henshilwood, los chimpancés enseñan a sus congéneres cómo cazar termitas, pero no mejoran el método ni se plantean hacerlo con otro tipo de rama; simplemente, repiten la acción una y otra vez. En cambio, los humanos actuales carecemos de esas limitaciones. De hecho, tomamos las ideas de otros y les añadimos detalles propios; vamos incorporando modificaciones hasta crear algo completamente nuevo y más complejo. Nadie por sí solo puede desarrollar la complicada tecnología que contiene un ordenador portátil; tales logros se consiguen gracias a la perspicacia creativa de generaciones de inventores.

Los antropólogos consideran un rasgo humano esa acumulación gradual de conocimientos. Para ello resulta primordial la capacidad de pasar el conocimiento de un individuo a otro, o de una generación a la siguiente, hasta que en algún momento alguien desarrolle una mejora. En marzo de 2012, el primatólogo del comportamiento Lewis Dean, ahora en la Sociedad Fisiológica de Londres, y otros cuatro científicos publicaron en *Science* un artículo donde explicaban por qué los humanos poseemos tal aptitud y los chimpancés o los monos capuchinos no. Dean y su equipo diseñaron un experimento mediante un problema con tres niveles de dificultad. Presentaron el problema a grupos de chimpancés en Texas, monos capuchinos en Francia y niños de una guardería en Inglaterra. Solo un chimpancé de los 55 primates no humanos alcanzó el nivel más alto de dificultad después de más de 30 horas de intentarlo. Los niños lo hicieron mucho mejor. A diferencia de los grupos de monos, trabajaron juntos, hablaron entre ellos, se ofrecieron ayuda y algunos enseñaron a los demás cómo resolver un problema. Después de dos horas y media, 15 de los 35 niños habían superado el tercer nivel de dificultad.

Equipados con esa destreza social y capacidades cognitivas, nuestros antepasados transmitieron los conocimientos a otros, un requisito para hacer avanzar el mecanismo de creatividad cultural. Pero hizo falta algo más para impulsar el proceso y llevar a *Homo sapiens* a nuevas metas creativas en África hace entre 60.000 y 90.000 años y, en Europa, hace 40.000 años. Mark Thomas, genético evolucionista del Colegio Universitario de Londres, opina que el empuje provino de la demografía. Su explicación es simple. Cuanto más numeroso fuera el grupo de cazadores recolectores, mayores serían las posibilidades de que alguno de sus miembros tuviera una nueva idea que produjera un avance técnico. Por otra parte, los individuos de un gran grupo que mantienen contactos frecuentes con grupos vecinos presentan más oportunidades de aprender innovaciones que los de grupos pequeños y aislados. «No solo importa lo inteligente que uno es», afirma Thomas, «sino también lo bien conectado que está».

Para contrastar tales ideas, Thomas y dos colaboradores desarrollaron un modelo informático para simular el efecto de la demografía en el desarrollo cultural. Con los datos genéticos de europeos actuales estimaron el tamaño de las poblaciones humanas en Europa a inicios del Paleolítico superior, en el momento en que la creatividad humana empezó a repuntar, y calcularon la densidad de la población. También analizaron la evolución de las poblaciones africanas, mediante la simulación de su crecimiento y los patrones de migración. Su modelo demostró que las poblaciones africanas alcanzaron la misma densidad que se había estimado en los inicios del Paleolítico superior europeo hace unos 101.000 años, justo antes de que se realizaran las primeras innovaciones en las regiones subsaharianas, según indica el registro arqueológico. También reveló el modo en que las grandes redes sociales alentaron la creatividad humana.

En noviembre de 2012 se publicaron en *Nature* nuevos datos arqueológicos sobre la revolución tecnológica que siguió al aumento de la densidad de población en África. Hace unos 71.000 años, los *Homo sapiens* de Pinnacle Point idearon y enseñaron a sus descendientes la compleja técnica de fabricar finas láminas de piedra para elaborar armas de proyectil. Calentaban la silcreta a una temperatura determinada para mejorar sus cualidades. A continuación la tallaban para producir láminas de pocos centímetros de longitud que después enganchaban a mangos de madera o de hueso con un adhesivo fabricado por ellos mismos. Los arqueólogos Fiona Coward, de la Universidad de Londres, y Matt Grove, de la Universidad de Liverpool, en un artículo publicado en *PaleoAnthropology* en 2011 compararon las innovaciones culturales con la propagación de los virus. Ambos necesitan unas condiciones sociales muy particulares para dispersarse; sobre todo, deben contar con poblaciones conectadas que puedan «infectarse» entre sí.

Ello nos lleva al mundo de hoy: competitivo, abarrotado y estrechamente conectado. Nunca antes los humanos habíamos vivido en ciudades tan pobladas. Accedemos a una enorme cantidad de conocimiento con tan solo pulsar una tecla y compartimos conceptos, proyectos y diseños innovadores gracias al crecimiento de las redes sociales de Internet. Nunca antes los inventos habían surgido con tal rapidez que van llenando nuestras vidas de nuevas modas, coches, músicas y arquitecturas.

Medio milenio después de que Leonardo da Vinci realizase su obra más famosa nos maravillamos de su genialidad, una creación que se sustenta en las innumerables ideas e invenciones concebidas por un linaje de artistas que se remonta al Paleolítico. Incluso hoy, una nueva tanda de artistas contempla la *Mona Lisa* para inspirarse y crear algo nuevo y deslumbrante. La cadena de la invención humana no ha acabado y, en un mundo extraordinariamente conectado, nuestro singular talento para crear tiene un largo camino por delante.

PARA SABER MÁS

Middle Stone Age bedding construction and settlement patterns at Sibudu, South Africa. Lyn Wadley et al. en *Science*, vol. 334, págs. 1388-1391, 9 de diciembre de 2011.

Hominin paleoneurology: Where are we now? Dean Falk en *Progress in brain research*, vol. 195, págs. 255-272, 2012.

Orígenes del pensamiento. VV.AA. Informe especial publicado en *Investigación y Ciencia* n.º 425, febrero de 2012.

BIOLOGÍA EVOLUTIVA

Dar vida al ADN fósil

La biotecnología revela cómo sobrevivieron los mamuts en ambientes fríos, además de otros misterios de la vida de los animales extintos

Kevin L. Campbell y Michael Hofreiter



Durante más de 150 años los científicos han utilizado huesos y dientes fósiles para reconstruir las especies del pasado. Los esqueletos permiten saber el tamaño y la forma corporal de animales extintos; las inserciones musculares indican cómo era su musculatura y cómo se movían; la forma y desgaste de los dientes reflejan la clase de alimentos que ingerían. A partir de este tipo de restos se ha obtenido una información extraordinaria. En contadas ocasiones se han podido estudiar también momias muy bien conservadas y cuerpos congelados, lo que ha añadido detalles a las reconstrucciones, como la longitud del pelaje, la forma de las orejas y el contenido estomacal de la última ingesta del animal. Pero aunque se han deducido numerosas características físicas de las formas de vida del pasado, sabemos muy poco sobre los procesos fisiológicos que las sustentaban.

EN SÍNTESIS

Durante mucho tiempo, el conocimiento sobre los animales extintos se ha basado en los restos fósiles de sus huesos y dientes.

Avances recientes en el estudio del ADN antiguo están revolucionando la investigación de estas especies del pasado.

Los investigadores pueden ahora recrear los genes de esos animales y examinar las proteínas codificadas por ellos.

La posibilidad de estudiar la paleofisiología resultaba impensable hace tan solo una década.

BRYAN CHRISTIE



Kevin L. Campbell es profesor de fisiología evolutiva y ambiental en la Universidad de Manitoba. Su investigación se centra en la hemoglobina de mamíferos actuales y en la evolución y las propiedades de las proteínas obtenidas de mamíferos extintos.



Michael Hofreiter es profesor de biología en la Universidad de York, en Inglaterra. Utiliza las secuencias de ADN fósil para estudiar la respuesta de los animales ante los cambios ambientales.

No obstante, nuevos datos están colmando esa laguna de conocimiento. Recientes avances biotecnológicos están ayudando a reconstruir genes de especies extintas y a recrear las proteínas (las moléculas que forman y controlan la maquinaria celular responsable de diferentes procesos vitales) codificadas por tales genes [*véase* «Viaje molecular al pasado», por R. Pérez Jiménez et al.; Investigación y Ciencia, octubre de 2011]. Se augura así el nacimiento de una nueva disciplina científica, la paleofisiología: el estudio del funcionamiento orgánico de animales desaparecidos. Si bien el campo se halla aún en sus albores, ya se han obtenido datos extraordinarios sobre la adaptación de uno de los animales icónicos de la prehistoria, el mamut lanudo, a las duras condiciones de las épocas glaciales. Aunque todavía no pueden clonarse animales prehistóricos como en *Parque Jurásico*, nuestro trabajo ha demostrado la posibilidad de observar procesos fisiológicos clave de animales que desaparecieron de la faz de la Tierra hace mucho tiempo.

RESTOS CONGELADOS

Para uno de nosotros (Campbell), el interés por el tema nació una tarde de 2001 mientras veía un programa de televisión en el que se documentaba la exhumación de los restos de un mamut lanudo hallado en el permafrost de Siberia. A raíz de la publicidad que se hizo en 1997 acerca de la clonación de la oveja Dolly, algunos expertos en el programa especulaban, de forma incorrecta, que el ADN del mamut podría hacer revivir a esos animales. Campbell pensó entonces en un objetivo mucho menos complejo y, por tanto, más factible. Deseaba averiguar el modo en que esos primos extintos de los elefantes asiáticos se habían adaptado al clima frío de las altas latitudes donde habitaron.

El registro fósil indica que el origen de los antepasados de los mamuts lanudos se sitúa en las llanuras subtropicales de África. Esos animales se dispersaron por Siberia hace dos millones de años, cuando la Tierra se adentraba en uno de los períodos más fríos de su historia, los ciclos glaciales del Pleistoceno. Igual que los elefantes africanos actuales, el principal reto fisiológico que habían afrontado los antepasados de los mamuts en su región de origen era evitar el sobrecalentamiento. Pero una vez que el linaje migró hacia el norte y el planeta se enfrió, el mayor problema consistía en mantener el calor corporal.

La mayoría del conocimiento del que disponemos sobre la biología de las especies desaparecidas procede de estudios detallados de restos fósiles, momificados o congelados. Por tanto, el análisis sobre las adaptaciones al frío de los mamuts se había centrado en los atributos físicos observados en los cuerpos recuperados, como el denso pelaje que los cubría y que les dio su nombre. Pero las características físicas constituyen solo una parte de los hechos, quizá la menos importante. Para poder sobrevivir en condiciones tan frías resultaba fundamental disponer de una trama de procesos fisiológicos. Por desgracia, tales procesos no dejan huella en el registro fósil, por lo que la única esperanza de poder estudiarlos consistía en recuperar pequeños fragmentos de ADN de los fósiles. Con ellos podría reconstruirse la secuencia de los genes y, a continuación, insertar estos en células vivas para obligarlas a sintetizar de nuevo las proteínas responsables de los procesos. Ello permitiría observar el funcionamiento preciso de las proteínas de animales extintos y compararlo con el de sus parientes actuales.

Aunque la idea de Campbell de estudiar las adaptaciones al frío de los mamuts utilizando el ADN antiguo resultaba mucho más simple que hacer revivir a un animal entero, llevarla a cabo exigía una cantidad inmensa de análisis biotecnológicos muy complejos. Afortunadamente, los enormes progresos recientes en la investigación del ADN antiguo han allanado el camino para alcanzar ese objetivo.

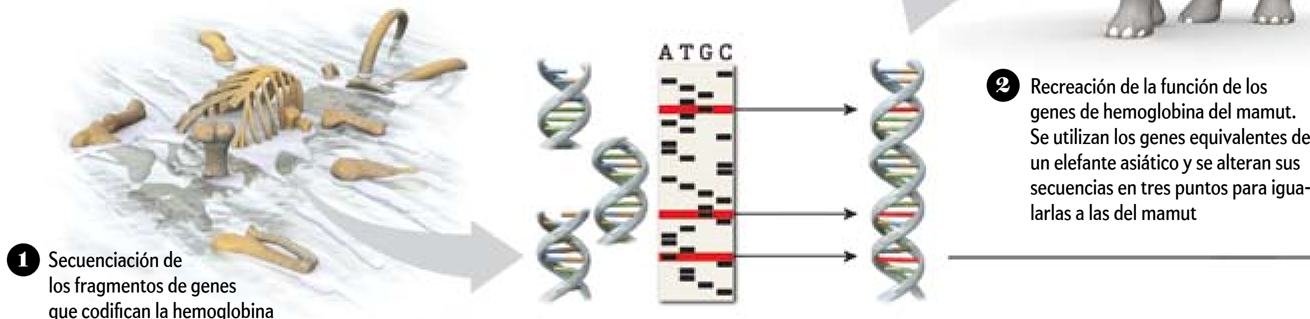
Incluso en las mejores circunstancias, de conservarse el ADN de animales muertos hace mucho tiempo, la cantidad recuperada resulta muy escasa. Además, el material está muy fragmentado y dañado químicamente. Las células de organismos vivos contienen dos tipos de ADN: las cadenas circulares simples en las mitocondrias (los orgánulos que suministran la energía de las células) y las cadenas mucho más complejas en el núcleo celular. Los primeros estudios del ADN antiguo se centraron en la diversidad del ADN mitocondrial, ya que es mucho más abundante que el nuclear. Ello se debe a que cada

EMILY COOPER

FASES DEL PROCESO

Dar vida a los mamuts

La reconstrucción de genes antiguos permite recrear las proteínas codificadas por ellos y observar su función, lo que aporta información sobre la fisiología de los animales extintos. De este modo, la reproducción de la hemoglobina de un mamut, la proteína que forma parte de los glóbulos rojos (***abajo***), ha demostrado que la molécula evolucionó para adaptarse a las condiciones frías en que vivió la especie. Con tales adaptaciones, la hemoglobina pudo seguir realizando su función y transportar de forma eficaz el oxígeno a los tejidos corporales.



célula posee centenares de mitocondrias pero un solo núcleo. No obstante, el ADN mitocondrial representa una parte diminuta de todo el contenido genético de la célula y, además, codifica unas pocas proteínas que solo utilizan las mitocondrias. La información más importante se ubica en el ADN nuclear. Al principio, se pensaba que resultaría imposible recuperar suficiente ADN nuclear como para poder estudiarlo. Pero, en 1999, Alex Greenwood, ahora en el Instituto Leibniz para la Investigación de Animales Salvajes y en Cautiverio, y sus colaboradores publicaron que en unos restos hallados en el permafrost se habían conservado, durante decenas de miles de años, pequeños fragmentos de ADN nuclear en una cantidad suficiente para analizarlos.

El trabajo de Greenwood demostró la posibilidad de obtener pequeños fragmentos de secuencias genéticas, formados por unos 70 nucleótidos (las «letras» del código genético), en especies tan antiguas como los mamuts. Aun así, parecía inviable secuenciar los centenares o miles de nucleótidos que constituyen un gen completo. Uno de nosotros (Hofreiter) halló la solución a ese problema aplicando una técnica, la amplificación múltiple de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR múltiple), que los biólogos moleculares utilizan para generar copias del ADN de especies actuales. Se superaba así el primer escollo para estudiar la fisiología de organismos extintos. En un estudio demostrativo preliminar publicado en 2005, Hofreiter y su equipo reconstruyeron el ADN mitocondrial completo (formado por 16.500 nucleótidos) de una especie de la edad del hielo, el mamut.

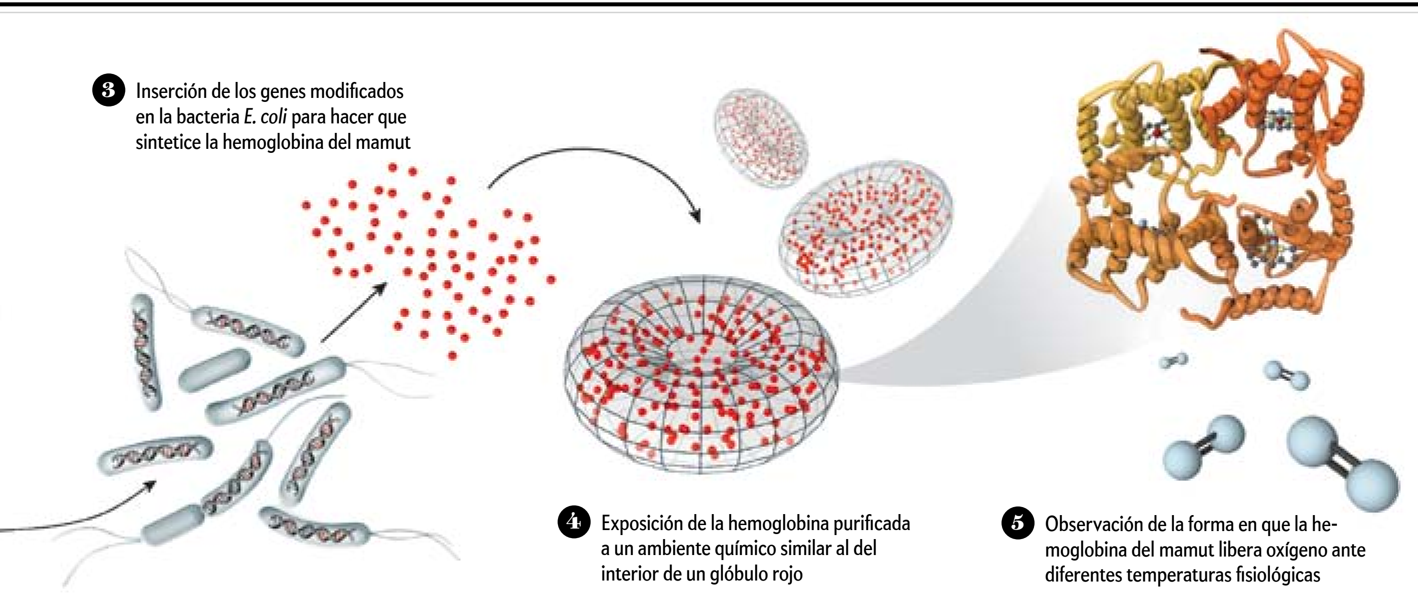
RUBIOS Y PELIRROJOS

Tras perfeccionar la técnica de secuenciación del ADN antiguo, el equipo de Hofreiter en Leipzig la ha aplicado para reproducir el primer genoma completo de una especie extinta: una vez más, el mamut. En concreto, se utilizó un hueso de la pierna de un ejemplar de 43.000 años de antigüedad muy bien conservado, descubierto en el norte de Siberia por Eske Willerslev, de la Universidad de Copenhague. El equipo seleccionó el gen receptor de la melanocortina 1 (*MC1R*), que contribuye a la coloración de las plumas en las aves y del pelo en los mamíferos. El interés del gen residía en su corta longitud y en la facilidad de insertarlo en las células, donde podía medirse su actividad molecular. Ello permitía relacionar una secuencia genética con un rasgo determinado.

Dado que el pelo de los mamuts conservados en el permafrost suele ser de color claro u oscuro, Hofreiter y su equipo atribuyeron ese rasgo a diferencias genéticas y no a las características químicas del sedimento donde permanecieron los restos durante miles de años. La secuenciación completa de los 1236 nucleótidos del gen *MC1R* reveló dos tipos de variantes genéticas, o alelos. El primer alelo se diferenciaba del gen correspondiente del elefante africano en un único nucleótido, mientras que el segundo contenía tres mutaciones más. Estas producían sustituciones de aminoácidos (las moléculas que forman las proteínas) en la proteína que codificaban.

A Hofreiter y sus colaboradores les extrañaba que dos de esas sustituciones ocurrieran en dos posiciones que apenas habían cambiado a lo largo de la evolución. Ante la ausencia de mutaciones comparables en otros mamíferos resultaba imposible saber si esas variaciones genéticas influirían en la coloración del pelaje. Pero el análisis de la actividad genética en las células demostró que una de las tres mutaciones en el segundo alelo daba lugar a una versión menos activa del gen de la pigmentación. A juzgar por la actividad de los genes de la pigmentación en otros mamíferos, esa variante más débil probablemente produjo un pelaje claro en algunos mamuts.

Por una coincidencia sorprendente, Hopi Hoekstra, entonces en la Universidad de California en San Diego, y sus colaboradores descubrieron que algunas poblaciones del ratón ciervo de costa poseen una variante del gen *MC1R* que produce el mismo tipo de aminoácido hallado en el segundo alelo de mamut. De hecho, los ratones con esa variante presentan un pelo más claro, lo que les proporciona un camuflaje natural en los ambientes arenosos donde habitan. En el caso de los mamuts, no está tan claro que el pelaje rubio les ofreciera una ventaja, ya que en los ambientes deforestados de Siberia los animales continuarían siendo visibles. Pero sí puede concebirse que ese





Los escasos restos excepcionalmente conservados, como el de esta cría de mamut de 42.000 años de antigüedad hallado en Rusia, ofrecen un caudal de información. Pero solo el ADN puede indicarnos con precisión la biología de este animal en vida.

GETTY IMAGES

color les ayudara a mantenerse calientes en un ambiente ventoso y frío, igual que sucede en aves y mamíferos árticos de tonalidades claras. Tal idea parecería contradictoria, ya que el pelaje claro refleja más la radiación solar; sin embargo, también desvía una parte de ella hacia la piel, donde es absorbida en forma de calor. Por el contrario, el pelaje oscuro absorbe la radiación solar en su parte más externa, donde el viento disipa el calor rápidamente.

Tras reconstruir con éxito los genes nucleares de los mamuts, el grupo de Hofreiter puso su atención en los neandertales, los parientes de *Homo sapiens* que vivieron en Eurasia y se extinguieron hace 28.000 años. El equipo secuenció un fragmento de 128 nucleótidos del gen *MC1R* que codificaba una sustitución de aminoácido no observada en los humanos actuales. De la misma forma que con el alelo del mamut, los análisis funcionales indicaban que ese cambio pudo reducir la función de la proteína, en comparación con la versión humana habitual. Dado que algunas personas pelirrojas y piel clara de ascendencia europea presentan variantes del gen *MC1R* con una actividad reducida semejante, proponemos que los neandertales tendrían también el pelo rojizo y la piel clara (aunque a causa de una mutación distinta, pero con los mismos efectos en la actividad proteica). En las altas latitudes donde vivían los neandertales escaseaba la luz ultravioleta que sirve para sintetizar la vitamina D. La piel clara pudo ayudarles a absorber una mayor cantidad de esa radiación que la piel oscura.

Esos estudios pioneros han demostrado que la reconstrucción genética de rasgos observables resulta hoy factible. Estamos preparados, por tanto, para utilizar esta nueva y poderosa herramienta para conocer los procesos biológicos de organismos extintos, su verdadera paleofisiología.

CUANDO LA SANGRE SE ENFRÍA

Todos los animales actuales de grandes dimensiones adaptados a climas fríos, como el reno o el buey almizclero, poseen un sistema sanguíneo de arterias y venas que se disponen de forma antiparalela a lo largo del cuerpo y de las extremidades. Tal configuración, conocida como *rete mirabile*, o red maravillosa, actúa como un intercambiador de calor a contracorriente en el que la sangre arterial caliente y oxigenada que sale del centro del cuerpo transfiere parte de su calor a la sangre venosa que regresa al corazón. Este gradiente térmico permite que la temperatura de las extremidades en contacto con las superficies frías, como las plantas de los pies, se mantenga justo por encima del punto de congelación, lo que reduce en gran medida la pérdida de calor corporal. Gracias a este ahorro de energía se necesitan menos calorías para mantener la temperatura corporal, una ventaja crucial para las especies árticas en invierno, cuando obtener calorías a menudo resulta difícil. Paradójicamente, esta adaptación anatómica limita la energía calorífica que necesita la extremidad para que la hemoglobina funcione de forma correcta. En los animales vertebrados, esta proteína, que se halla en los glóbulos rojos, transporta el oxígeno de los pulmones a los tejidos corporales. Para romper el enlace químico entre la hemoglobina y el oxígeno se requiere energía. Por tanto, cuando desciende la temperatura disminuye su capacidad de liberar oxígeno.

Para compensar esa limitación, la hemoglobina de los mamíferos resistentes al frío cuenta con una fuente de calor suplementaria. Aunque todavía desconocemos el mecanismo molecular exacto de ese proceso, parece que conlleva la unión de otras moléculas con la hemoglobina dentro de las células. La formación de esos enlaces químicos desprende energía calóri-

ca, la cual se aprovecha para ayudar a liberar el oxígeno de la hemoglobina a los tejidos.

El equipo de Campbell propuso la hipótesis de que la hemoglobina del mamut habría experimentado también cambios evolutivos que le permitirían transportar oxígeno en ambientes fríos. La secuenciación de los genes de la hemoglobina en los mamuts y su comparación con la de los elefantes asiáticos podría revelar entonces si habían sucedido tales cambios y en qué consistían.

En colaboración con Alan Cooper, de la Universidad de Adelaida, realizamos los primeros intentos de secuenciar los genes de dos mamuts que codifican la proteína globina, una parte fundamental de la hemoglobina. Pero chocamos con un gran contratiempo: la mayoría de las muestras disponibles no tenían la calidad suficiente como para obtener segmentos de ADN aprovechables. En ese momento, los equipos de Campbell y Cooper unieron sus esfuerzos con los de Hofreiter y utilizaron el mismo extracto de ADN del que se había obtenido el gen *MC1R*. De esta forma, pudieron establecer la secuencia genética completa de la hemoglobina de dos mamuts y determinar las secuencias de aminoácidos de las cadenas de la globina.

Los resultados iniciales indicaban que una de las cadenas de la globina del mamut difería de la del elefante asiático en 3 de las 146 posiciones. El hallazgo resultaba apasionante, porque estábamos convencidos de que ese trío de sustituciones en los aminoácidos nos señalaban las diferencias genéticas de una fisiología adaptada al frío. Las primeras pruebas a favor de tal hipótesis vinieron de una variante extraña de la hemoglobina humana, la hemoglobina Rush, que presenta una de las mutaciones halladas en la secuencia del mamut. Aunque la variante solo se distingue de la normal en una posición de aminoácido, ello altera por completo las propiedades bioquímicas de la proteína. La mutación reduce su sensibilidad a la temperatura, lo que le permite liberar oxígeno en condiciones frías más fácilmente, igual que sucede en la hemoglobina de los mamíferos adaptados al frío.

El siguiente paso para averiguar si los cambios observados en la hemoglobina del mamut representaban una adaptación al frío consistía en reproducir la proteína y examinarla en acción. Para crear copias de los genes de la hemoglobina del mamut, tomamos genes de la hemoglobina de elefantes asiáticos y los alteramos hasta obtener las tres mutaciones presentes en las secuencias de los mamuts. Luego insertamos los genes reproducidos en la bacteria *Escherichia coli*, engañándola para que sintetizara una hemoglobina idéntica a la que corría por las venas del mamut de hace 43.000 años cuyo ADN habíamos recuperado.

Por primera vez en la historia teníamos la posibilidad de analizar un importante proceso fisiológico de una especie extinta, de la misma manera que se haría para estudiar dicho proceso en animales actuales. Medimos la capacidad de la hemoglobina del mamut y del elefante de unirse al oxígeno y desprenderse de él a diferentes temperaturas y en disoluciones que imitaban el ambiente químico interno de los glóbulos rojos. Tal y como predecían los estudios sobre la hemoglobina Rush, a bajas temperaturas la proteína del mamut liberaba más oxígeno que la del elefante (a una temperatura corporal de 37 grados, ambas hemoglobinas funcionaban con la misma eficacia). Curiosamente, la capacidad de la hemoglobina del mamut para unirse con otras moléculas y así crear la fuente de calor adicional necesaria para liberar el oxígeno se basa en variaciones genéticas distintas de las halladas en los mamíferos árticos actuales.

Cabe destacar también que, aunque la mutación de los mamuts representa una adaptación al frío, no sucede así con la variante humana de hemoglobina Rush, ya que la mutación desestabiliza la proteína y sus portadores padecen anemia crónica. Sin embargo, se desconoce por qué ese efecto secundario tan indeseable aparece en la hemoglobina de los humanos y no en la de los mamuts.

¿RENACIMIENTO DEL MAMUT?

Por supuesto, la modificación de la hemoglobina solo puede explicar en parte la resistencia de los mamuts lanudos al frío. Todavía quedan por descubrir otras adaptaciones bioquímicas de esos animales, así como las de decenas de especies extintas. Desgraciadamente, la multitud de genomas secuenciados en los últimos años no sirve de mucho, porque se ha utilizado la técnica de secuenciación al azar (*shotgun sequencing*), que proporciona un conjunto aleatorio de secuencias. Si bien el método permite tener una visión global de los cambios genéticos, no es lo suficientemente completo como para ofrecer datos fisiológicos, a menos que se repita tantas veces que alcance un coste prohibitivo.

Una nueva estrategia, la captura por hibridación, permite obtener información sobre genes específicos con un coste menor. Con ella podrían realizarse estudios a mayor escala y establecer redes de comparación entre los genes de mamuts siberianos de períodos relativamente templados y los de aquellos que vivieron en los máximos glaciales, cuando las capas de hielo tenían su máximo espesor. La captura por hibridación permitiría comparar diversas poblaciones geográficas de una misma especie, por ejemplo, los mamuts siberianos y los de España. Tales estudios ofrecerían la ocasión de determinar la variabilidad genética de una especie y proporcionarían información sobre las diferentes adaptaciones fisiológicas según las condiciones geográficas o climáticas. Aunque el futuro se presenta fascinante (imagínese el lector la posibilidad de desvelar 50.000 años de evolución), nuestra capacidad para analizar la paleofisiología tal vez resulte más limitada. Lo ideal sería estudiar in vivo las proteínas extintas, ya que muchas de sus propiedades solo se manifiestan en el organismo vivo. Sin embargo, no parece probable que tales estudios se realicen a corto plazo, ya que ello exigiría recrear especies desaparecidas.

Por el momento debemos contentarnos con observar las proteínas antiguas dentro de tubos de ensayo y cultivos celulares. Ya estamos utilizando esas técnicas para conocer la fisiología de otros animales del pasado, entre ellos el mastodonte y la vaca marina de Steller, un mamífero marino del Ártico recién desaparecido. La posibilidad mucho más compleja de clonar esos animales en el futuro inmediato sigue siendo una fantasía. Mientras tanto, continuaremos dando vida a las especies extintas al ir estudiando, una a una, sus proteínas.

PARA SABER MÁS

Multiplex amplification of the mammoth mitochondrial genome and the evolution of Elephantidae. Johannes Krause et al. en *Nature*, vol. 439, págs. 724-727, 9 de febrero de 2006.
A melanocortin 1 receptor allele suggests varying pigmentation among Neanderthals. Carlos Lalueza Fox et al. en *Science*, vol. 318, págs.1453-1455, 30 de noviembre de 2007.
Substitutions in woolly mammoth hemoglobin confer biochemical properties adaptive for cold tolerance. Kevin L. Campbell et al. en *Nature Genetics*, vol. 42, págs. 536-540, junio de 2010.



Una antigua lacra: la viruela marcó a este niño de por vida en 1915.

Sonia Shah es periodista científica y autora de *The fever: how malarias has ruled humankind for 500.000 years* («La fiebre: cómo la malaria ha dominado a la humanidad durante 500.000 años»). Actualmente escribe un nuevo libro sobre enfermedades emergentes.



EPIDEMIOLOGÍA

LA NUEVA AMENAZA DE LOS POXVIRUS

La viruela puede haber desaparecido, pero sus primos víricos, la viruela del simio y la bovina, están organizando su regreso

Sonia Shah

Hace diez mil años, cuando apareció la viruela, la humanidad no pudo hacer mucho más que rezar a los dioses para pedir ayuda. El virus que causaba la enfermedad atacaba primero el revestimiento de la nariz o de la garganta y se extendía por todo el cuerpo hasta provocar una erupción cutánea característica, seguida de la formación de ampollas llenas de virus sobre la piel. A lo largo de la historia, el «monstruo moteado» mató hasta un tercio de las personas que infectaba. Solo durante el siglo xx fallecieron más de 300 millones de hombres, mujeres y niños.

Sin embargo, a finales de los años setenta, la lacra mortal fue eliminada de la faz de la Tierra gracias a las campañas de vacunación masiva que protegieron a millones de personas, que se quedaron con una pequeña cicatriz en el brazo. Sin ningún sitio donde esconderse en el mundo natural (los humanos son el único huésped del virus), la viruela fue llevada a la extinción. En la actualidad, las únicas muestras víricas conocidas se hallan encerradas en dos laboratorios gubernamentales especializados, uno en EE.UU. y el otro en Rusia. Si no se produce un accidente catastrófico de laboratorio o una liberación intencionada ni se vuelve a crear el virus mediante ingeniería genética, la viruela nunca más volverá a sembrar la muerte y la miseria en el mundo.

EN SÍNTESIS

Cuando se erradicó la viruela, hace 35 años, los humanos dejaron de vacunarse frente a ella.

En los años siguientes, la población general ha perdido la inmunidad, no solo al virus de la viruela, sino también a otros poxvirus a los que la vacuna de la viruela ponía en jaque.

El número de casos de viruela del simio y bovina ha empezado a aumentar, lo que ha elevado la posibilidad de que una nueva lacra mundial se extienda en lugar de la viruela tradicional.

CORBIS

La Organización Mundial de la Salud (OMS), que había organizado la campaña de erradicación, hizo esta pública en 1979, dos años después de registrarse el último caso esporádico en un trabajador de un hospital somalí. Desde entonces, ningún país ha vacunado de forma sistemática a sus ciudadanos frente a la viruela, aunque los EE.UU. empezaron a inocular a cierto personal sanitario y a determinados miembros de sus fuerzas armadas después de los ataques terroristas del 11 de septiembre de 2001. Por tanto, toda una generación ha llegado a la edad adulta sin ninguna exposición a la enfermedad o a la vacuna, que a veces causaba efectos secundarios graves.

Y ahí está el problema. La vacuna contra la viruela no solo protege contra el virus variólico. Cualquier persona que se haya vacunado también ha desarrollado inmunidad frente a otros virus emparentados con él, como la viruela del simio y la bovina. Dada la mayor magnitud de las infecciones de viruela en ese momento, tal protección secundaria se vio como un beneficio menor.

Ahora que la vacuna contra la viruela ya no se administra de forma generalizada, la pregunta es: ¿podrían estos patógenos desconocidos, que al igual que la viruela, pertenecen al género *Orthopoxvirus*, representar un nuevo peligro para los seres humanos? Hay motivos para preocuparse. A diferencia de la viruela tradicional, la del simio y la bovina se esconden de forma natural en roedores y otros animales, por lo que nunca se eliminarán por completo. El número de casos de viruela del simio y bovina en los humanos ha aumentado de manera constante en los últimos años; ambos virus han comenzado a infectar a otros animales más allá de sus huéspedes normales, lo que ha aumentado la posibilidad de que se propague a través de nuevas vías por todo el planeta.

Nadie sabe cómo evolucionarán la viruela del simio y la bovina a lo largo del tiempo. A los virólogos les preocupa que, si los virus mutan y se propagan con mayor facilidad de una persona a otra, podrían devastar amplias zonas del mundo. Esta sombría posibilidad impulsa a un pequeño grupo de investigadores a aprender más acerca de la aparición de estas o de cualquier otra plaga de poxvirus, lo que les permitirá dar la alarma si observan que los virus muestran signos de convertirse en formas más amenazadoras.

DISTINTA GRAVEDAD

La historia y la biología de los poxvirus ofrece algunas pistas sobre lo que puede esperarse de los parientes de la viruela en el futuro. Históricamente, el 60 por ciento de los patógenos que asolan a la humanidad, incluidos los ortopoxvirus, se han originado en el cuerpo de otros vertebrados. El pariente vivo más cercano de la viruela, el taterapox, se aisló a partir de un jerbo salvaje en África en 1968. Los análisis moleculares sugieren que el ancestro evolutivo de la viruela quizá tuvo su inicio en una especie de roedor africano, al parecer hoy extinguido. Del mismo modo, la viruela del simio y la bovina, a pesar de sus nombres, viven en topillos, ardillas y otros roedores silvestres.

Cuando el ancestro de la viruela se propagó por primera vez a los humanos, seguramente no era muy contagioso, afirma el microbiólogo Mark Buller, de la Universidad de San Luis. Pero, según él y otros investigadores, en algún momento apareció una variante mucho más transmisible. El cambio crítico permitió que el virus se propagara a través de la tos, exhalaciones o estornudos de una persona infectada. Mientras tanto, los humanos comenzaron a vivir en lugares más densamente poblados, lo que hizo más probable el contagio de una persona a otra. La combinación del cambio biológico y del nuevo entorno dio al virus emergente la ventaja necesaria para convertirse en una lacra mundial.

Sin embargo, el hecho de que un virus se transmita con facilidad no lo hace necesariamente letal. De hecho, todavía se desconoce por qué la gravedad de los poxvirus resulta tan variable. En la mayoría de las personas, las infecciones por viruela bovina, del camello o del mapache desencadenan poco más que una erupción en la piel, con pústulas llenas de virus que desaparecen por sí solas. En cambio, la viruela del simio puede resultar mortífera para los humanos. Aun así, no todos los virus de esa enfermedad presentan la misma virulencia. El peor subtipo, descubierto en la cuenca del Congo, mata a cerca del 10 por ciento de las personas que infecta, mientras que otra versión de África occidental rara vez provoca la muerte. Precisamente esta última cepa causó en 2003 los primeros casos registrados de viruela del simio en el hemisferio occidental. El brote, que tuvo lugar en seis estados de EE.UU., obligó a hospitalizar a 19 personas, entre ellos un niño que sufrió encefalitis y una mujer que se quedó ciega y necesitó un trasplante de córnea. Los investigadores siguieron el rastro de la infección y localizaron su origen en roedores importados de Ghana. Estos habían pasado el virus a perritos de las praderas domésticos que, a su vez, habían infectado a sus dueños. Los hospedadores intermedios permiten que un virus que normalmente vive en animales con escaso contacto con los humanos se propague a un gran número de personas.

Pequeñas diferencias genéticas podrían explicar la gravedad variable de las infecciones por viruela. Por ejemplo, algunos poxvirus poseen genes que codifican proteínas que impiden una respuesta inmunitaria eficaz contra la infección. Al comparar diferentes poxvirus, los expertos se centraron en un gen que se hallaba en varios tipos de ellos. En las cepas más mortíferas de viruela, el gen daba lugar a la síntesis de una proteína que, según se ha demostrado, dificulta la coordinación de algunas células del sistema inmunitario para contraatacar al virus. Pero el gen equivalente en las cepas de la viruela del simio de la cuenca del Congo (menos mortales que la viruela), contenía las instrucciones para la síntesis de una proteína mucho más corta. Cuando los investigadores examinaron la versión más leve de viruela de África occidental, observaron que el virus carecía del gen y la proteína en cuestión no podía fabricarse. Luego los datos indicaban que la proteína más corta de las cepas de viruela del simio de la cuenca del Congo las hacía, de alguna manera, menos letales que la viruela tradicional.

El debate científico sobre el modo en que las diferentes especies de poxvirus adquirieron este y otros genes hace plantear la cuestión de si el virus de la viruela del simio y sus parientes podrían convertirse en amenazas más peligrosas de lo que son ahora. Los genes, que no resultan imprescindibles para la replicación del poxvirus, parecen copias fieles de otros que los virus adquirieron de organismos que infectaron en algún momento del pasado evolutivo. Sin embargo, en el transcurso normal de un ciclo infectivo, los virus no se sitúan cerca del material genético almacenado en el núcleo de las células del huésped.

Una posible explicación, aceptada entre los virólogos de la viruela, postula la infección simultánea de un huésped humano o de otro vertebrado con un poxvirus y un retrovirus. Tales coinfecciones parecen producirse con frecuencia. Se sabe que los retrovirus incorporan sus propios genes en el ADN del huésped (alrededor de un 8 por ciento del genoma humano consiste en ADN procedente de retrovirus). Tal vez la actividad bioquí-

mica excepcional del retrovirus dentro de la célula permitiese al poxvirus capturar los genes del huésped.

De ser cierta esa hipótesis, se augura un mal presagio. Los poxvirus son genéticamente estables y no suelen mutar con rapidez. Si tienen la capacidad de robar genes de sus anfitriones que los hacen más virulentos, entonces resulta imposible predecir qué daños ocasionará un poxvirus poco agresivo, por no hablar de uno mortífero, en las circunstancias adecuadas. El cambio desde una amenaza leve hasta una grave podría ocurrir de forma más rápida e imprevisible de lo que nadie podría haber sospechado antes.

EL «PRIMO PEQUEÑO» DE LA VIRUELA

En la actualidad, el virus de la viruela del simio está mejor preparado que cualquiera de sus parientes víricos para convertirse en una amenaza mundial. Los virólogos se refieren a él como el «primo pequeño» de la viruela, en parte porque ocasiona una enfermedad clínicamente indistinguible de esta. Descrito por primera vez en monos en cautividad en 1957, el virus suele residir en roedores africanos, posiblemente en la ardilla *Funisciurus congicus*. Hasta ahora, la mayoría de los brotes se han producido en África Central, con las notables excepciones de los EE.UU. en 2003 y Sudán en 2006.

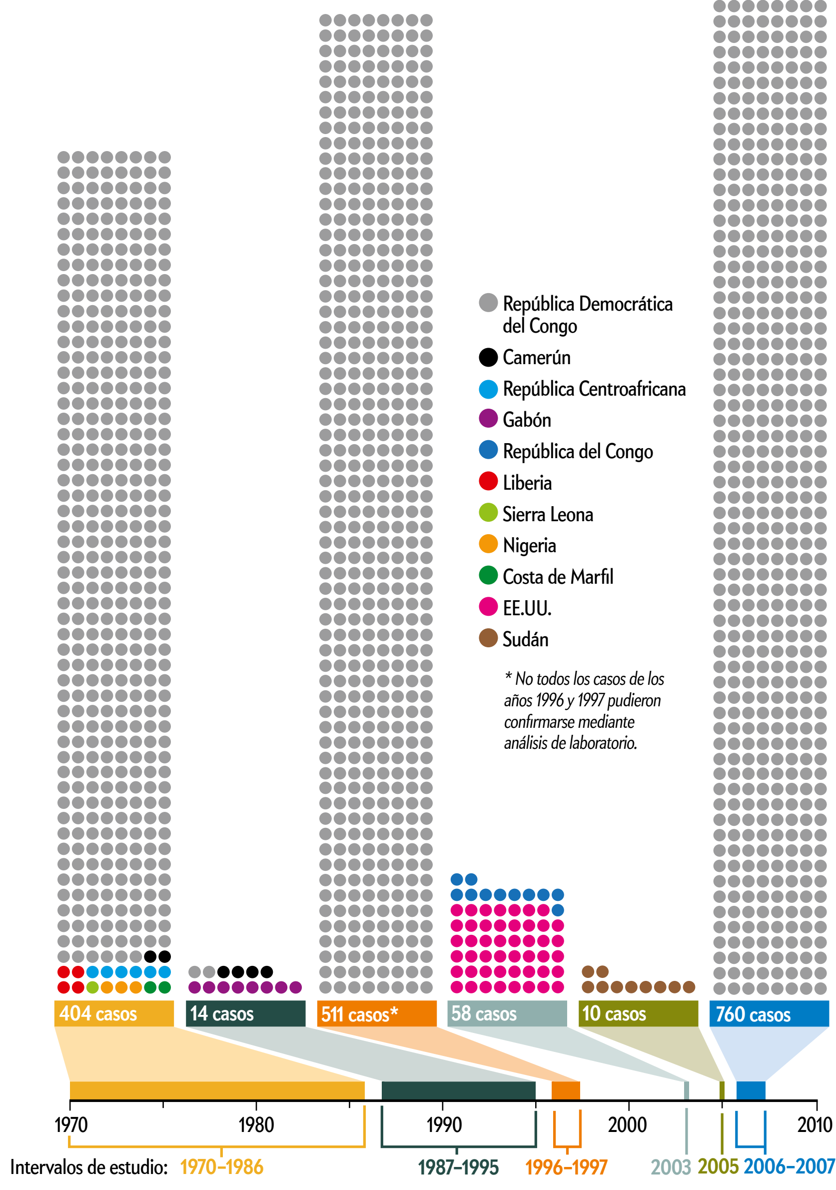
En 2002, la epidemióloga Anne W. Rimoin, de la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA), se hallaba en Kinshasa, en la República Democrática del Congo, cuando oyó por primera vez que algunos miembros de la población local habían contraído la viruela del simio. Desconocía el número de individuos infectados, el modo en que se habían expuesto al virus o si este se había propagado a otras personas. Pero sabía que la enfermedad era potencialmente mortal y deseaba aprender más sobre ella.

Rimoin empezó preguntando a su alrededor y se percató de que probablemente había muchos más casos de los que se estaban informando. Pero ¿cómo determinarlos? Como era de esperar, dada la escasez de centros sanitarios en el Congo rural, solo unas pocas personas enfermas solicitaban ayuda médica. Y aquellas que se habían recuperado no podían identificarse fácilmente a través de análisis sanguíneos, porque no había forma de saber si la presencia de los anticuerpos frente al poxvirus se debía a una vacunación anterior contra la viruela o a otra infección por un poxvirus. La evaluación de la

UNA TENDENCIA PREOCUPANTE

Rápido ascenso de la viruela del simio

Realizar un seguimiento de las infecciones de viruela del simio en humanos resulta difícil: la enfermedad se produce sobre todo en áreas remotas, alejadas de la ayuda médica, y no es fácil confirmar infecciones pasadas. En cualquier caso, el número de casos aumentó después de que, en 1980, finalizara la vacunación sistemática frente a la viruela tradicional, que también protegía frente a la del simio. Pero los resultados de los estudios intermitentes llevados a cabo durante los últimos 40 años sugieren que la viruela del simio ha provocado más infecciones de lo que cabría esperar. Los investigadores sospechan que los disturbios civiles y la deforestación han empujado a la población a comer o manipular animales salvajes infectados. El aumento en los casos podría tener consecuencias de largo alcance, puesto que proporciona al virus más oportunidades para adaptarse mejor a los humanos.



FUENTE: «MONKEYPOX: AN EMERGING INFECTION FOR HUMANS?» POR JOEL G. BREMAN EN *EMERGING INFECTIONS 4*, DIRIGIDO POR W. M. SCHELD, W. A. CRAIG Y J. M HUGHES, ASM PRESS, 2000; «OUTBREAKS OF HUMAN MONKEYPOX AFTER CESSATION OF SMALLPOX VACCINATION», POR MARY G. REYNOLDS E INGER K. DAMON EN *TRENDS IN MICROBIOLOGY*, VOL. 20, N.° 2, FEBRERO DE 2012; JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

incidencia de la viruela del simio requirió hallar personas que padecieran una infección aguda a causa de la enfermedad, momento en el que era posible comprobar la presencia del virus a partir de las pústulas de la piel.

Rimoin comenzó su búsqueda tras establecer un centro de investigación en las profundidades del bosque. No había carreteras, ni cobertura de telefonía móvil ni señal de radio. Fletaba aviones para desplazarse y pasó días caminando y viajando en canoa o en moto para localizar los casos de viruela del simio entre los habitantes del interior del Congo.

Los resultados fueron alarmantes. En comparación con datos similares recopilados por la OMS entre 1981 y 1986, Rimoin halló que el número de casos de viruela del simio en humanos se había multiplicado por veinte. Aun así, cree que esas cifras, que se publicaron en 2010, representan una estimación a la baja. «Es la punta del iceberg», asegura. Después de todo, la OMS realizó una operación de mayor envergadura y mejor financiada hace treinta años. Sin duda, el equipo de Rimoin pasó por alto muchos más casos, en términos relativos, que la OMS.

AUMENTO DE LA VIRUELA DEL SIMIO

Aunque el aumento de los casos de viruela del simio era mayor de lo previsto, no despertó asombro. Después de todo, la mayoría de la población del país no estaba vacunada frente a los poxvirus. (La República Democrática del Congo dejó de vacunar frente a la viruela en 1980.)

Pero otras investigaciones indicaban que estaba pasando algo más. El ecólogo James Lloyd-Smith, uno de los colaboradores de Rimoin en la UCLA, utiliza modelos informáticos para estudiar el modo en que las enfermedades se propagan de los animales a los humanos. Tras analizar los datos de Rimoin, pensó que la suspensión de la vacuna de la viruela y la posterior pérdida de inmunidad frente a los poxvirus no podían explicar por completo el aumento de los casos. Sin duda, los acontecimientos en que los roedores infectados transmitieron el virus a los humanos debieron al menos quintuplicarse.

El motivo por el que la viruela del simio se propaga a los humanos con mayor frecuencia es motivo de discusión. Tal vez el desmonte continuado de las tierras para su uso agrícola y para la quema de madera haya facilitado el contacto de las personas con ardillas, ratones y otros roedores infectados. Además, la población puede haberse visto obligada a comer animales potencialmente infectados como consecuencia de la guerra civil congoleña. Un estudio realizado en 2009 y publicado en octubre de 2011 señaló que un tercio de la población del Congo rural se alimenta de roedores hallados muertos en el bosque y que, curiosamente, el 35 por ciento de los casos de viruela del simio tienen lugar durante la temporada de caza y de labranza. La mayoría de las personas contraen la viruela del simio por contacto directo con animales infectados, al manipularlos o comerlos.

Rimoin y otros virólogos temen que con las mayores oportunidades de infectar a las personas, la viruela del simio pueda adaptarse mejor al cuerpo humano. Buller estudia las formas en las que los ortopoxvirus causan las enfermedades en los humanos y en los animales. La viruela del simio «ya puede matar a la gente», dice, y también puede propagarse entre las personas, solo que no tan bien. Lo único necesario para transformar la viruela del simio en un patógeno humano mucho más contagioso serían unos pocos ajustes sin importancia en un rasgo vírico actual.

PROPAGACIÓN DE LA VIRUELA BOVINA

Los informes sobre personas y animales infectados por roedores con el virus de la viruela bovina también están aumentando, en este caso en Europa.

Las infecciones por esa viruela resultan leves en la mayoría de las personas. Después de que el virus se introduzca en las células y desarme la respuesta inmunitaria inicial del huésped, una descarga de anticuerpos fabricados por la víctima frente al virus evita que el patógeno se propague a los tejidos del cuerpo. No ocurre así en las personas con el sistema inmunitario debilitado, ya sea a causa de infección por el VIH, quimioterapia o tratamiento para evitar el rechazo de un trasplante. Según Malcolm Bennett, de la Universidad de Liverpool, esas personas pueden sufrir una enfermedad parecida a la viruela y fallecer. Los expertos en salud pública estiman que, desde 1972, el número de personas inmunodeprimidas en EE.UU. con propensión a padecer una enfermedad grave debida a la viruela bovina y a otros poxvirus ha aumentado en 100 veces.

Bennett, patólogo veterinario, estudia la ecología y la evolución de la viruela bovina en la fauna salvaje. En el Reino Unido, el virus reside en los topillos rojos, topillos de campo y ratones campestres sin causar daños. Los gatos domésticos lo contraen de los roedores que cazan y pueden exponer a las personas que cuidan de ellos a la enfermedad, una cadena de eventos que explica la mitad de los casos de viruela bovina en humanos en el Reino Unido.

Al igual que la viruela del simio, la bovina ha empezado a hacer incursiones en animales distintos de sus reservorios normales. Con las poblaciones de topillos rojos en auge gracias a los inviernos suaves y otras condiciones climatológicas favorables, las ratas tal vez hayan empezado a desempeñar la función de intermediario en la transmisión de esa enfermedad, como la que tuvieron los perritos de las praderas en el brote de la viruela del simio de 2003. Mary Reynolds, epidemióloga en los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) de los EE.UU., apunta que ha habido un aumento de los informes sobre casos de viruela bovina asociados a ratas, ya sean relacionados con animales o con mascotas. Esa tendencia resulta preocupante, porque las ratas pardas y negras se multiplican con gran eficacia por todo el mundo. Si la viruela bovina se establece en las ratas, podrían infectarse varios millones de personas más que con los topillos y los ratones de campo, a causa de una mordedura de rata o el contacto con sus excrementos.

De hecho, los ortopoxvirus presentan una enorme capacidad para colonizar especies nuevas. El virus que se utilizó para crear las vacunas modernas contra la viruela ahora se propaga libremente en el ganado lechero de Brasil, así como en los búfalos de la India. Y hay una serie de ortopoxvirus que nunca se han aislado o caracterizado por completo, señala Reynolds. Dadas las oportunidades adecuadas, las cepas de viruela menos conocidas podrían extender sus áreas de distribución en nuevas regiones y especies. Algunas se volverán patógenas para los humanos, añade Bennett. «Simplemente, todavía no han logrado dar el salto a nuestra especie.»

ARMADOS Y VIGILANTES

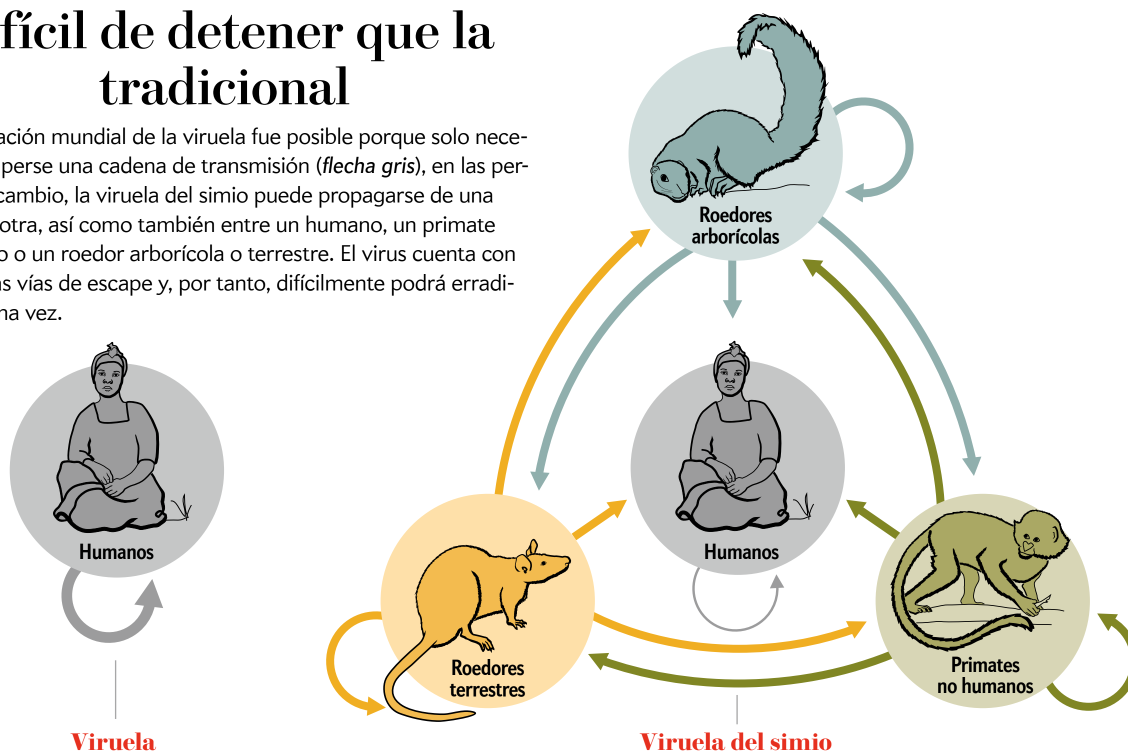
A medida que va aumentando el número de personas que nunca han recibido la vacuna contra la viruela, los virólogos esperan que la incidencia de la viruela del simio, la bovina y otros tipos de poxvirus siga creciendo en los humanos.

Si alguno de esos virus adquiere la capacidad de infectar a las personas, se necesitarán nuevos fármacos y vacunas (y los

MUCHAS VÍAS DE INFECCIÓN

La viruela del simio, más difícil de detener que la tradicional

La erradicación mundial de la viruela fue posible porque solo necesitaba romperse una cadena de transmisión (*flecha gris*), en las personas. En cambio, la viruela del simio puede propagarse de una persona a otra, así como también entre un humano, un primate no humano o un roedor arborícola o terrestre. El virus cuenta con demasiadas vías de escape y, por tanto, difícilmente podrá erradicarse alguna vez.



FUENTE: «HUMAN MONKEYPOX: AN EMERGING ZOONOTIC DISEASE», POR SCOTT PARKER, ANTHONY NUARA, R. MARK L. BULLER Y DENISE A. SCHULTZ EN *FUTURE MICROBIOLOGY*, VOL. 2, N.º 1, 2007; PORTIA SLOAN ROLLINGS

recursos necesarios para utilizarlos) para contener la amenaza. Debido al temor de la liberación intencionada del virus de la viruela, surgido a raíz del 11-S, se están desarrollando una serie de nuevas vacunas y fármacos para combatir la enfermedad. Tales fármacos quizá proporcionen también protección frente a los poxvirus que aparezcan de forma natural. Pero la producción y distribución de estos, así como la protección frente a sus inevitables efectos adversos, constituirá una tarea más compleja y costosa. Las nuevas vacunas contra la viruela, como Imvamune, de Bavarian-Nordic, se han diseñado para administrarse de forma segura, incluso para las personas inmunodeprimidas; pero deben ofrecerse en dosis más elevadas y en dos aplicaciones en lugar de una, lo que las hace más caras que las vacunas tradicionales contra la viruela. Un fármaco nuevo, ST 246, fabricado por Siga Technologies, evita que los ortopoxvirus pasen de una célula a otra en un huésped. A pesar de que aún no ha sido aprobado por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de los EE.UU., el gobierno federal ya ha comprado una gran cantidad del medicamento y lo ha incorporado a la reserva nacional de defensa biológica.

En lugares como la cuenca rural del río Congo, con limitaciones en la financiación sanitaria para nuevas vacunas y fármacos de vanguardia, la mejor opción por ahora tal vez consista en realizar una mayor vigilancia y desarrollar programas de educación de la comunidad. Gracias a un programa de educación sobre la viruela del simio llevado a cabo por los CDC, junto con funcionarios locales de salud y organizaciones no gubernamentales de la República Democrática del Congo, la proporción de la población que supo reconocer los casos de viruela del simio aumentó del 23 al 61 por ciento. La difícil vigilancia de Rimoin sobre esa enfermedad también continúa. La investigadora lleva a cabo nuevos estudios encaminados a la secuenciación de los genes de variantes que infectan hoy a animales y personas para ver cómo puede estar cambiando el virus. Una mejor detección significa más oportunidades de atender y aislar a las personas infectadas, lo que reduce la posibilidad del virus de mutar en nuevas formas que se propaguen con mayor eficacia entre las personas.

La antigua guerra entre los poxvirus y los humanos quizá no terminara cuando aquel trabajador de 21 años de edad de un hospital somalí se deshizo de la infección de viruela en 1977. Con las nuevas herramientas y medidas de vigilancia, los expertos se hallan mejor armados y se mantienen más alerta que nunca. Pero para evitar que otro virus de la viruela asole a la humanidad, la sociedad deberá mantener esas defensas durante algún tiempo más.

PARA SABER MÁS

Extended interhuman transmission of monkeypox in a hospital community in the Republic of the Congo, 2003. Lynne A. Learned et al. en *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 73, n.º 2, págs. 428-434, agosto de 2005. **www.ajtmh.org/content/73/2/428.full**

Monkeypox virus and insights into its immunomodulatory proteins. Jessica R. Weaver y Stuart N. Isaacs en *Immunology Reviews*, vol. 225, págs. 96-113, octubre de 2008. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2567051**

Major increase in human monkeypox incidence 30 years after smallpox vaccination campaigns cease in the Democratic Republic of Congo. Anne W. Rimoin et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 107, n.º 37, págs. 16.262-16.267, 14 de septiembre de 2010. **www.pnas.org/content/107/37/16262.full**

Página web del laboratorio de Anne W. Rimoin, de la Universidad de California en Los Ángeles: **www.ph.ucla.edu/epi/faculty/rimoin/rimoin.html**



Polinizadores artificiales: La abeja robótica que muestra esta imagen ha sido aumentada de tamaño para que puedan apreciarse sus detalles. Para ver su verdadero tamaño, pase la página.

EN SÍNTESIS

Una colonia de abejas robóticas podría llevar a cabo todo tipo de tareas, desde polinizar cultivos hasta participar en misiones de rescate en caso de catástrofe. El proyecto RoboBee trabaja en el diseño de estos insectos artificiales.

Su reducido tamaño plantea todo tipo de retos técnicos e informáticos. Debido a la imposibilidad de emplear piezas mecánicas normales, los investigadores han creado «músculos» artificiales, inspirados en la anatomía de una abeja real.

Otro desafío consiste en reproducir la inteligencia colectiva de un enjambre, en el que miles de insectos se coordinan sin ningún liderazgo centralizado. Una colmena robótica debe poder lograr sus objetivos aunque algunos de sus miembros fracasen.



Robert Wood es profesor de ingeniería y ciencias aplicadas en la Universidad Harvard y el Instituto Wyss de Ingeniería Inspirada en la Biología. El año pasado fue galardonado con el premio Alan T. Waterman de la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU.



Radhika Nagpal enseña ciencias de la computación en Harvard y el Instituto Wyss. Sus investigaciones sobre el comportamiento colectivo abarcan los campos de la inteligencia artificial, la robótica y la biología.



Gu-Yeon Wei es profesor de ciencias de la computación en Harvard. Sus estudios se centran en el rendimiento eficiente de los sistemas de cómputo.

TECNOLOGÍA

Abejas robóticas

El proyecto RoboBee persigue diseñar enjambres de insectos artificiales. Dotados de una «inteligencia colectiva» similar a la de las colmenas reales, podrían acometer un gran número de tareas

Robert Wood, Radhika Nagpal y Gu-Yeon Wei

No hace mucho que las abejas melíferas de varias regiones del mundo sufrieron una misteriosa plaga, conocida como síndrome de despoblamiento de las colmenas. Gran parte de la polinización comercial depende de las abejas, por lo que la enfermedad supuso una amenaza para la agricultura. En 2009, junto con otros colaboradores de Harvard y de la Universidad Nororiental de EE.UU., comenzamos a considerar la posibilidad de crear una colonia de abejas robóticas. Nos preguntábamos si una población de insectos mecánicos podría imitar no solo la conducta de las abejas una a una, sino el complejo comportamiento colectivo que emerge de la interacción entre miles de ellas. Hoy, en el marco del proyecto RoboBee, ya hemos construido las primeras ciberabejas y estamos desarrollando métodos para lograr que miles de ellas cooperen, como en una colmena real.

A primera vista, la tarea se antoja imposible. Millones de años de evolución han hecho de las abejas máquinas increíbles: pueden volar durante horas, su diminuto cuerpo se mantiene estable frente a las rachas de viento, hallan flores y esquivan depredadores. No parece que podamos exigir talentos semejantes a un robot del tamaño de una moneda de cinco céntimos.

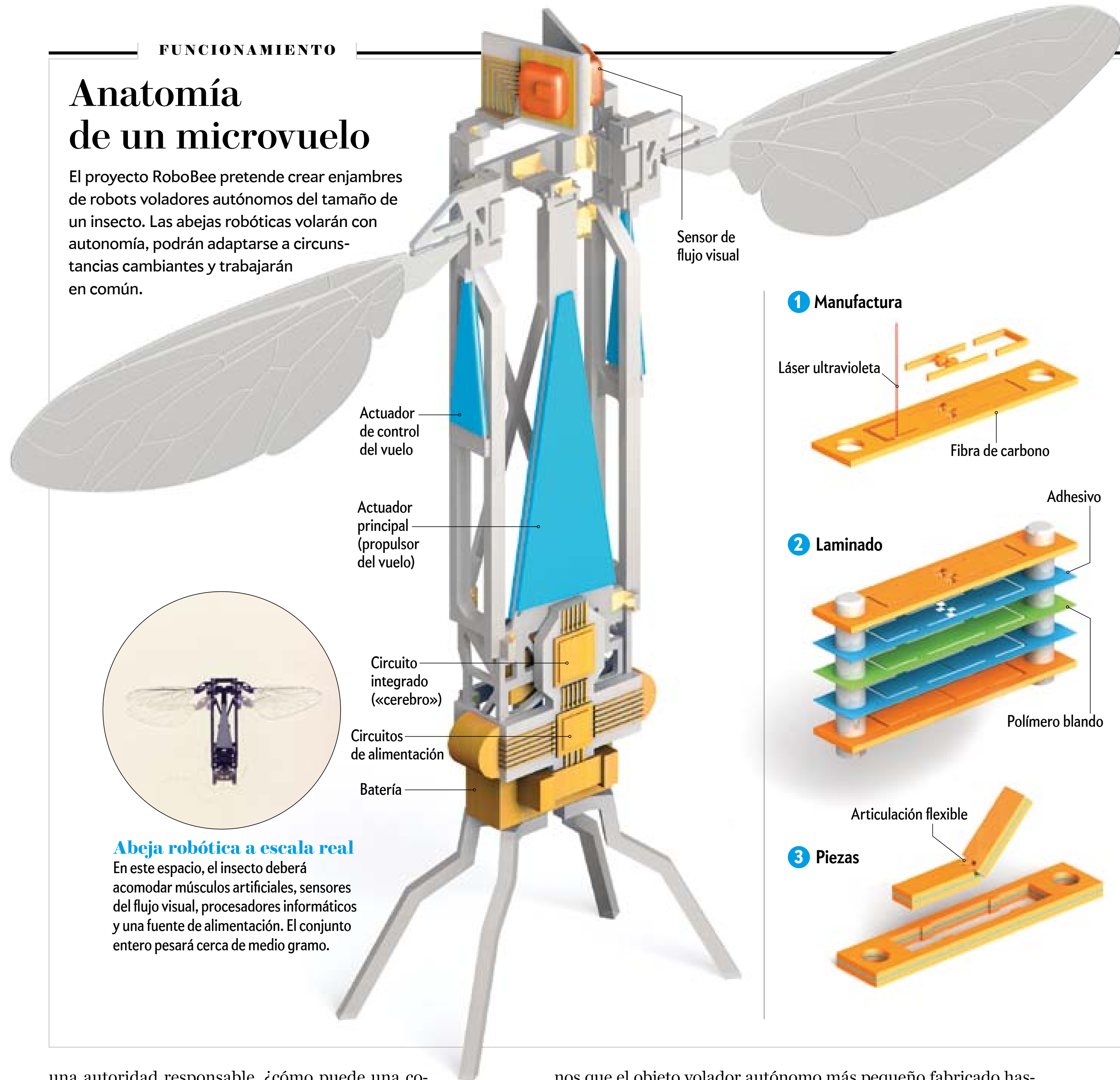
Pensemos ahora en la colmena. En ella no parece haber gobierno centralizado alguno; sin embargo, decenas de miles de insectos se reparten con acierto las tareas en pos del bienestar de toda la comunidad. Si se necesita más polen, salen abejas de refuerzo a aprovisionarse; cuando la colmena requiere cuidados, permanecen más insectos en ella; y si sucede algo imprevisto (como la muerte inesperada de una abeja reina), el grupo se adapta con rapidez a las nuevas circunstancias. Sin

TRAVIS RATHBONE

FUNCIONAMIENTO

Anatomía de un microvuelo

El proyecto RoboBee pretende crear enjambres de robots voladores autónomos del tamaño de un insecto. Las abejas robóticas volarán con autonomía, podrán adaptarse a circunstancias cambiantes y trabajarán en común.



Abeja robótica a escala real
En este espacio, el insecto deberá acomodar músculos artificiales, sensores del flujo visual, procesadores informáticos y una fuente de alimentación. El conjunto entero pesará cerca de medio gramo.

BRYAN CHRISTIE (*ilustración*); TRAVIS RATHBONE (*fotografía*)

una autoridad responsable, ¿cómo puede una colonia de insectos resolver situaciones tan complejas?

Aunque la agricultura figura entre sus posibles aplicaciones, una colmena robótica podría ejecutar muchas tareas más. Para multitud de cometidos, un conjunto de robots diminutos, simples y ágiles resultaría más eficaz que unas pocas máquinas de enormes prestaciones. Tras un desastre natural, podrían liberarse unas mil abejas robóticas (con un peso total inferior a un kilogramo) a fin de detectar sonidos, calor o el dióxido de carbono exhalado por los supervivientes. Aunque solo tres de ellas lo lograsen, el enjambre se habría apuntado un éxito. No podemos decir lo mismo de los robots de salvamento actuales, cuyo coste ronda los 100.000 dólares por unidad.

Sin embargo, aún hemos de superar enormes dificultades técnicas. Nuestras abejas robóticas no deberían medir más de unos pocos centímetros ni pesar más de medio gramo (cien veces menos que el objeto volador autónomo más pequeño fabricado hasta la fecha). En tales dimensiones hemos de incorporar el sistema de vuelo, los componentes electrónicos del «cerebro» y la visión del robot, así como los controles que deben regular la interacción con otros miembros del enjambre. Con todo, los últimos avances en ciencia de materiales, tecnología de sensores y arquitectura informática ponen tales objetivos a nuestro alcance.

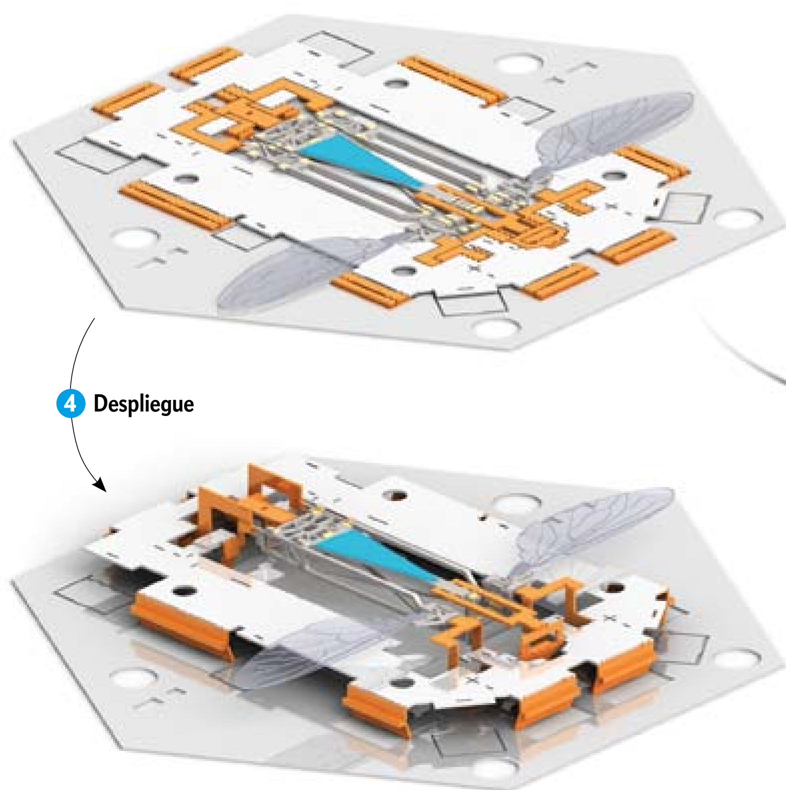
CUERPO Y VUELO

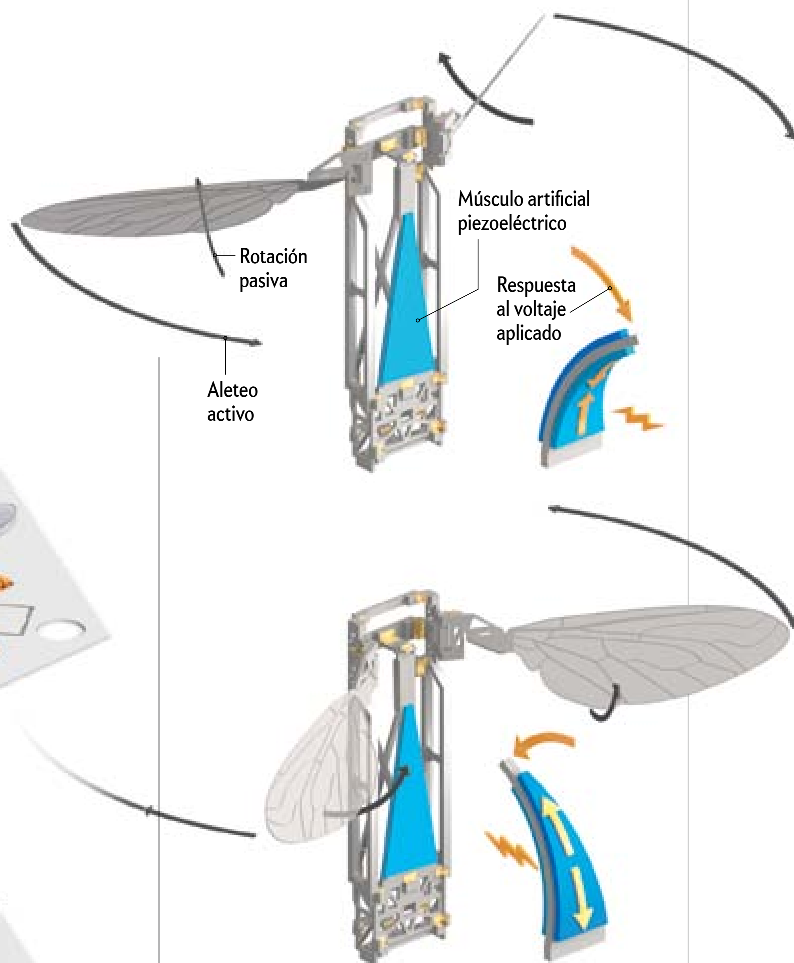
El principal reto a la hora de fabricar un robot volador tan diminuto reside, precisamente, en el sistema de vuelo. Los progresos en miniaturización de robots logrados durante la pasada década no nos sirven de mucho, ya que el minúsculo tamaño de nuestras abejas cambia por completo la clase de fuerzas que intervienen en el proceso. Las fuerzas de superficie, sobre todo el rozamiento, cobran más importancia que las asociadas al volu-

Montaje desplegable

La fabricación de robots tan diminutos comporta grandes retos. Las diferentes piezas se confeccionan a partir de capas de material rígido, como fibra de carbono, entre las que se intercalan películas de polímeros blandos. Las hendiduras practicadas en la fibra permiten que el polímero se doble y opere a modo de articulación flexible. Elaborar piezas con un diseño estratificado redunda en un proceso de montaje más eficiente (*abajo a la izquierda*).

Primero, las capas se tallan con un láser ultravioleta 1. Después, se juntan y se unen al polímero con un adhesivo 2. De ese sustrato pueden extraerse componentes individuales 3. Por último, la construcción en dos dimensiones puede desplegarse y adoptar su forma tridimensional 4.





Aleteo

El vuelo de una abeja robótica depende de la acción de «músculos» artificiales, materiales piezoeléctricos que se contraen al aplicarles un voltaje. Las alas se mueven de dos maneras: hacia delante y hacia atrás, y girando su orientación. En vez del aleteo vertical característico de las aves, el movimiento se asemeja más al de las patas de un perro que nada en una piscina. Los músculos controlan el aleteo, pero la rotación es pasiva; viene determinada por la inercia de las alas, la interacción de estas con el aire y la elasticidad de la junta con el resto del cuerpo.

men, como la gravedad o la inercia. Ello deja de lado la mayoría de las piezas mecánicas habituales, como rodamientos, engranajes y motores electromagnéticos, frecuentes en todo tipo de robots, pero inadecuadas para nuestro propósito.

Nuestras abejas robóticas no emplean motores giratorios ni engranajes. En su lugar, su diseño imita la anatomía de un insecto volador. Dos tipos de «músculos» artificiales se encargan de propulsar y controlar el vuelo: en el tórax, un actuador impulsa el mecanismo que bate las alas; a su vez, otros actuadores menores generan los pares motores necesarios para maniobrar y controlar el aleteo. Estos dispositivos operan en la junta entre el ala y cuerpo del insecto.

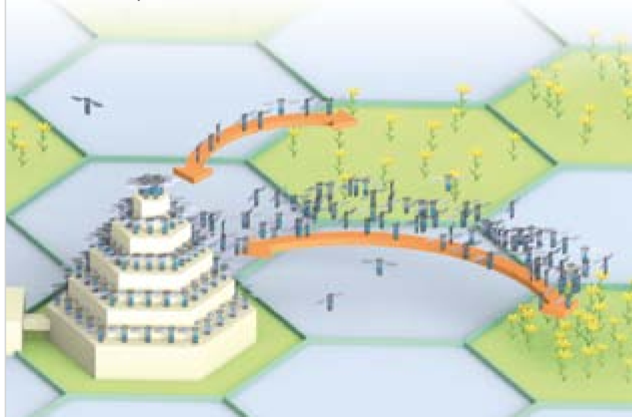
Los músculos artificiales se componen de materiales piezoeléctricos que se contraen cuando se aplica un voltaje entre sus caras. Los inconvenientes de los que suelen adolecer estos dispositivos —su fragilidad y el alto voltaje necesario— se convierten aquí en ventajas debido a su reducido tamaño: cuanto menores sean, más rápido se moverán. Dado que la cantidad de energía suministrada por ciclo (y unidad de masa) se mantiene casi constante, una mayor velocidad en el aleteo se traduce en un aumento de potencia. No en vano, estos «músculos» operan con una potencia equiparable a la que desarrollan los músculos de los insectos reales con un tamaño similar.

En los últimos años hemos probado docenas de configuraciones de actuadores y juntas. Estas deben resultar fáciles de construir, ya que las miles de abejas robóticas de una colonia deberán fabricarse en serie. Los mejores modelos hallados hasta ahora se basan en piezas formadas por tres capas: dos láminas rígidas entre las que se sitúa una delgada película de polímero. Para formar las articulaciones, se tallan hendiduras en las capas rígidas; de esta manera, la película de polímero puede flexionarse con facilidad.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La colonia en acción

Una colonia de miles de ciberabejas deberá repartir las tareas entre sus miembros aun cuando carezca de una clara visión del entorno. En la situación ilustrada, el enjambre debe localizar flores y polinizarlas. Cada robot comienza explorando distintas zonas. Al regresar a la colmena, los robots indicarán a sus compañeras dónde se encuentran las flores. Esa información marcará el destino de las expediciones futuras, ya que se asignarán más robots a las zonas donde haya más trabajo. Esta manera colectiva de proceder garantizaría el éxito de la misión aunque la comunicación directa entre abejas se vea restringida por motivos técnicos.



Si bien hemos realizado grandes progresos en lo tocante a construir un robot del tamaño de una abeja, aún debemos diseñar un sistema de alimentación óptimo. Para cubrir sus necesidades energéticas durante el vuelo, gran parte de la masa del insecto debería residir en al actuador principal y en la unidad de alimentación (la «batería», aunque también estamos considerando emplear una micropila de combustible óxido sólido). Las dificultades de la alimentación se convierten en un círculo vicioso: una unidad mayor almacenará más energía, pero su mayor peso exige un sistema propulsor más potente y este, a su vez, necesita una fuente de alimentación mayor.

Aunque aún no disponemos de una abeja robótica capaz de volar con total autonomía, hemos demostrado que un ejemplar de unos cien miligramos puede alcanzar el impulso necesario para despegar, si bien después hemos de mantenerlo atado a una fuente de alimentación externa. Además, nuestro insecto puede estabilizarse por sí solo mediante una combinación de mecanismos activos y pasivos. Con todo, nuestras mejores estimaciones para el tiempo de vuelo no pasan de unas decenas de segundos. A fin de lograr una mayor autonomía, estamos trabajando para reducir al máximo el peso del insecto, así como para optimizar el rendimiento de cada una de las piezas.

CEREBRO Y NAVEGACIÓN

La alimentación no es la única atadura que retiene a nuestra ciberabeja. Otro problema reside en dotar al insecto de un cerebro que le permita percibir el entorno, tomar decisiones y controlar el vuelo. Los dispositivos electrónicos externos pueden servir como solución provisional en el laboratorio, pero en condiciones reales el insecto necesitará un cerebro propio.

A un nivel de organización superior, el cerebro electrónico del insecto deberá orquestar asimismo su interacción con los restantes miembros de la colonia. A tal fin nos dispusimos a construir un cerebro estructurado en capas: con sensores que interpreten el entorno físico, un «sistema nervioso» electrónico que realice las funciones de control básicas, y una corteza cerebral programable para tomar decisiones de alto nivel. Como primer paso, decidimos diseñar un subsistema cerebral que capacitase al robot para volar con autonomía. Superar este reto exige un bucle de control riguroso entre varios sensores, los procesadores de señales y el movimiento de las piezas del cuerpo.

Para elegir el tipo de sensores y la estructura de la circuitería cerebral volvimos a inspirarnos en la naturaleza. Las moscas, por ejemplo, se valen de dos tipos de sensores: los propioceptivos, que informan al insecto sobre su condición interna (en nuestro caso, la rapidez del aleteo o la carga de la batería), y los exteroceptivos, que refieren datos relativos al entorno.

Los sensores modernos, como los dispositivos GPS, los acelerómetros o los giróscopos multiaxiales, resultan demasiado pesados o consumen una energía excesiva. En estos momentos estamos investigando un sistema de visión electrónico que, similar al de las abejas reales, analiza el «flujo óptico», o movimiento aparente de los objetos en el campo visual del sensor. Para entender cómo funciona, imagine que se encuentra mirando al exterior desde la ventanilla de un automóvil: los objetos más próximos atraviesan el campo visual con rapidez; los más lejanos, a menor velocidad. Un sistema visual que aproveche esa información puede generar una representación tridimensional del entorno muy detallada, incluso equipado con un sensor de imagen pequeño y sencillo.

El cerebro de una abeja robótica debe poseer la potencia suficiente para procesar el torrente de datos provenientes de los sensores de imagen, así como para controlar los actuadores corporales. Tampoco aquí podemos utilizar componentes estándar, por lo que hemos explorado un nuevo tipo de arquitectura informática que combina la computación de uso genérico con una clase de circuitos especiales, conocidos como aceleradores de soporte físico, o aceleradores de *hardware*. A diferencia de los procesadores habituales (los microcircuitos genéricos que, en los ordenadores domésticos, ejecutan todo tipo de tareas), la aceleración por soporte físico emplea circuitos muy específicos que realizan una sola tarea con gran precisión. Así, el cerebro del robot podría realizar en tiempo real los rápidos cálculos requeridos por el bucle de control y mantener un vuelo estable dentro de los límites de consumo energético.

Uno de los grandes retos a los que nos enfrentamos consiste en determinar a qué podemos renunciar y a qué no. Por ejemplo, nos gustaría dotar a nuestras abejas de una cámara de alta resolución, pero un gran número de píxeles requiere sensores mayores y aumentar la potencia de cálculo. ¿Dónde se encuentra el punto óptimo? Para responder a tales preguntas hemos ideado una cámara de prueba. Colocamos el cuerpo de la ciberabeja sobre un sensor fijo de fuerzas multiaxiales y pares rotatorios, y le permitimos desplegar las alas en simulacro de vuelo. Sobre las paredes proyectamos imágenes del entorno que el insecto deberá atravesar, a fin de explorar la interacción entre el sistema visual, el cerebro y el cuerpo del insecto.

Por supuesto, controlar el vuelo solo supone el punto de partida. Al mismo tiempo, estamos trabajando en el desarrollo de sensores adicionales que faculten a la ciberabeja para realizar tareas diversas, como localizar a las víctimas de un seísmo que han quedado atrapadas entre los escombros.

Por desgracia, no prevemos que nuestras abejas dispongan de un sistema que permita la comunicación directa entre ellas:

los costes energéticos asociados a las comunicaciones inalámbricas resultan excesivos. Sin embargo, ello no implica que los insectos deban limitarse a actuar cada uno por su cuenta.

COLONIA Y COMUNICACIÓN

Una abeja robótica resulta minúscula en comparación con el entorno al que debe enfrentarse. Además, las restricciones de potencia y peso limitan la clase de sensores y métodos de comunicación. Por ello, aparte de diseñar la anatomía y el cerebro de estos pequeños autómatas, hemos de figurarnos cómo actuará un enjambre. Tal y como ocurre con las abejas reales, un insecto aislado solo podrá llevar a cabo un número muy limitado de tareas; sin embargo, esas restricciones no tienen por qué aplicarse a la colonia. Su comportamiento colectivo permitirá explorar áreas extensas, reconocerlas, repartirse las tareas de modo eficiente y cumplir su propósito aunque varios de sus miembros fracasen. Un enjambre de abejas pequeñas, ágiles y «sacrificables» podría llevar a cabo todo tipo de actividades impracticables para un robot individual; desde polinizar un campo hasta labores de rescate.

Desde principios de los años noventa, la rama de la inteligencia artificial conocida como «inteligencia de enjambre» ha permitido desarrollar potentes algoritmos de coordinación inspirados en el comportamiento de los insectos eusociales. Estos abarcan desde estrategias de búsqueda en común hasta la división del trabajo. Pero, aun contando con tales algoritmos, controlar el comportamiento de toda una colonia de abejas robóticas plantea varias dificultades.

En primer lugar, programar y razonar desde el punto de vista de cada abeja se torna inviable cuando se trata de miles de ellas: sería como pedir a un programador que escribiese las instrucciones para cada uno de los bits físicos de un ordenador. En su lugar, necesitamos un sistema que funcione a modo de compilador. A partir de un conjunto de instrucciones escritas en un lenguaje de programación inteligible, los compiladores generan los ceros y unos con los que trabaja la máquina. De igual modo, para programar el enjambre necesitaremos un lenguaje abstracto de alto nivel que transforme instrucciones globales en programas que rijan la conducta de cada abeja.

¿Qué lenguaje podría capturar el comportamiento de una colmena real, así como el que esperamos de una colonia de abejas robóticas? Aunque carecemos de una respuesta definitiva, hemos desarrollado dos lenguajes de programación abstractos que podrían resultar de utilidad. Uno de ellos, Karma, permite especificar un diagrama de flujo de las tareas que debe realizar la colmena. Este emplea información procedente de cada uno de los individuos y asigna los recursos disponibles a unas tareas u otras, de un modo que imita el papel que desempeña la colmena en las colonias reales de abejas melíferas.

Otro método diferente, OptRAD («optimización de la reacción de advección y difusión»), trata la colonia de robots voladores como un fluido que se difunde en el entorno. Cada abeja ejecuta un algoritmo probabilístico que, a partir del estado del medio, determina si el robot debe realizar o no una tarea concreta. Al considerar la colonia como un fluido, OptRAD puede efectuar razonamientos de alto nivel sobre el resultado que se espera de una determinada acción, así como modular su comportamiento para adaptarse a nuevas circunstancias.

Aún es mucho lo que nos queda por aprender sobre la manera de construir y manejar una colonia compuesta por miles de robots autónomos, un número muy superior al de los humanos que la controlan. Cuando los miembros del enjambre se cuentan por millares, controlarlos uno por uno resulta impracticable. Imaginemos que cada robot poseyese un conmutador de encendido y apagado que tardase cinco segundos en activarse. Si tuviésemos que accionar mil robots uno por uno, el proceso se demoraría una hora y media. Cualquier otro aspecto, desde el coste al mantenimiento, sufre limitaciones similares. Cada pequeño autómata debe resultar barato, fácil de construir y sencillo de operar. En un caso ideal, el tiempo necesario para llevar a término cualquier acción no debería depender de cuántos individuos formen la colonia (o, al menos, debería crecer muy lentamente con el tamaño del enjambre).

Para afrontar los retos descritos hemos desarrollado el sistema Kilobot: cientos de robots del tamaño de una moneda que se desplazan mediante vibraciones y que pueden comunicarse entre sí. Este colectivo nos permite ensayar nuestros lenguajes de programación, así como poner a prueba los modelos matemáticos que describen el comportamiento emergente. Puede también emplearse para poner a prueba la clase de conducta que nos gustaría conseguir en las colonias de ciberabejas. Por ejemplo, resulta posible pedirles que busquen un objeto y que, una vez que uno de ellos lo encuentre, comunique al resto su localización.

El sistema Kilobot ha sido diseñado en código abierto, con miras a que todo programador interesado pueda tomar parte en el proyecto. También resulta posible adquirir los robots prefabricados a K-Team, una compañía de robótica educativa. Esperamos que este sistema estandarizado ayude a concebir nuevas ideas y promover avances científicos colectivos, inasequibles para grupos reducidos de investigadores. Después de todo, también los humanos dependemos de la cooperación colectiva para conseguir ciertos resultados.

EL FUTURO

Pese a todos los avances, aún queda mucho por hacer. No obstante, podemos aventurar que dentro de pocos años ya veremos abejas robóticas volando en el laboratorio. En unos cinco o diez años más, su uso tal vez se haya generalizado.

En 1989, el experto en robótica Rodney Brooks escribió un artículo en el que defendía el empleo de pequeños robots en los programas de exploración espacial. Su trabajo se titulaba «Rápido, barato y fuera de control: Una invasión robótica del sistema solar», en referencia al conocido aforismo ingenieril según el cual ningún producto comercial puede ser a la vez rápido, barato y fiable: a lo sumo, debe conformarse con dos de esos tres atributos. Sin embargo, cuando disponemos de un gran número de agentes, el fracaso de uno de ellos no reviste demasiada importancia.

Brooks acertó de plano a la hora de reinterpretar dicho concepto en el ámbito de la robótica. Si logramos que un gran número de autómatas sencillos trabajen de manera conjunta, no deberemos preocuparnos por fallos individuales. La única manera de asegurar el éxito de los exploradores robóticos es permitir que, de tanto en tanto, alguno de ellos se desplome.

PARA SABER MÁS

Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors. Michael Rubenstein, Christian Ahler y Radhika Nagpal en *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, págs. 3293-3298, 14-18 de mayo de 2012.

Progress on «pico» air vehicles. R. J. Wood et al. en *International Journal of Robotics Research*, vol. 31, n.º 11, págs. 1292-1302, septiembre de 2012.

Canal en YouTube del Laboratorio de Microrrobótica de Harvard: **www.youtube.com/MicroroboticsLab**

por Fernando Jordán Montés

Venenos robados

Los nudibranquios emplean como defensa las sustancias tóxicas de algunos organismos de los que se alimentan

Entre los pocos seres vivos que se atreven a devorar a los peligrosos cnidarios (anémonas de mar, corales, ascidias e hidroideos) destacan los nudibranquios, o babosas marinas, que, pese a poseer un cuerpo blando y delicado, no resultan afectados por las sustancias urticantes de los primeros. Esta inmunidad les permite aprovechar en exclusiva unos nutrientes que resultan vetados para la mayor parte de los organismos marinos, lo que sin duda les confiere una notable ventaja competitiva.

Los nudibranquios, sorprendentemente, poseen además muy pocos enemigos. El secreto de ello reside en su elevada capacidad defensiva, basada en un poderoso arsenal químico. Este se compone de diversas sustancias, de origen muy variado, que las babosas van concentrando en el cuerpo. En unas pocas especies los productos son de síntesis propia y son excretados a través de la piel en forma de un mucus de olor repelente y sabor desagradable, o bien de propiedades nocivas e irritantes. Otras especies exudan un ácido concentrado cuyo componente principal es el ácido sulfúrico. Con semejante catálogo de sustancias repulsivas se comprende que pocos depredadores ataquen a los nudibranquios.

Pero en la mayoría de los casos el origen de los venenos empleados por los nudibranquios resulta mucho más complejo. Las babosas marinas no solo se alimentan de los peligrosos cnidarios, sino que además extraen de ellos las sustancias tóxicas que poseen y las acumulan en su cuerpo para utilizarlas en su propia defensa. Las babosas, inmunes a la acción de dichas toxinas, devoran a los cnidarios y al mismo tiempo ingieren las células urticantes que, sin ser alteradas, pasan a través del tracto digestivo y se depositan y concentran en el extremo de las protuberancias existentes en el dorso del cuerpo, los ceratos. Esas estructuras constituyen el sistema defensivo de los nudibranquios. Cualquier animal que ataque a una babosa marina experimentará la misma reacción alérgica que si se hubiera aproximado a los cnidarios tóxicos.

—Fernando Jordán Montés

ALBERTO JORDÁN MONTÉS (*fotografías*)



▲ **Los doridáceos,** como este *Hypselodoris*, presentan dos estructuras relevantes en el dorso, los rinóforos (órganos sensoriales) y las branquias, con gran variabilidad de formas y colores.



▼ **Los rinóforos** (*naranja*) son órganos sensoriales que captan moléculas presentes en el agua, así como vibraciones y cambios de presión. En *Flabellina exoptata*, el minúsculo punto en la base del rinóforo corresponde a un ojo sensible a los cambios de luz. Además, los tentáculos orales aportan información sobre el entorno, lo que ayuda a percibir el contorno del sustrato o localizar presas.



Hypselodoris elegans junto a su oviposición (*derecha*). Tras la puesta y eclosión de los huevos, surgen larvas planctónicas con concha protectora, la cual desaparecerá en la metamorfosis hacia la etapa adulta.



Como hermafroditas simultáneos, los nudibranquios poseen órganos femeninos y masculinos funcionales, lo que permite a cada individuo fecundar y ser fecundado en la misma cópula. Dado que los órganos sexuales se ubican siempre en la parte lateral derecha, los individuos deben situarse en sentido inverso uno con respecto al otro. En la imagen, *Chromodoris lochi*.

Carentes de branquias estrictas, los aeolidáceos han desarrollado ceratos, apéndices que cumplen la función de estas y que además albergan sustancias defensivas. En la imagen, *Flabellina affinis*.

por Arantza Etxeberría

Arantza Etxeberría es profesora de filosofía de la ciencia en la Universidad del País Vasco.



¿Qué es un organismo individual?

La filosofía de la biología aborda con nuevos datos los tradicionales conceptos de organismo e individuo

Los organismos individuales constituyen un objeto de estudio prioritario para la biología. Pero esta se ocupa también de otras clases de entidades: individuos que no son organismos (genes, poblaciones, especies), partes de los organismos o disociadas de estos y almacenadas en biobancos o en laboratorios (priones, orgánulos, células, tejidos, órganos), entidades semivivas (semillas, esporas) o restos de seres vivos (fósiles). A menudo no hay acuerdo sobre la clase de entidad a la que pertenece un objeto biológico: se debate si los virus son o no organismos vivos, si los endosimbiontes constituyen un solo organismo o incluso si los seres multicelulares deben entenderse como sistemas ecológicos formados por entidades de muchas especies. Por ello, el estatus teórico de los conceptos de organismo e individuo se ha convertido recientemente en un tema importante para la filosofía de la biología. En la discusión hay asuntos filosóficos básicos en juego: la naturaleza de la frontera entre lo vivo y lo no vivo, si hay entidades básicas en la vida y si las diferentes disciplinas biológicas pueden unificarse.

Ni el concepto de organismo ni el de individuo cuentan con una acepción establecida y consensuada en biología; asimismo, hay ciertas diferencias en el uso de cada uno de ellos. La noción de organismo tiene un carácter sistémico, asociado con la integración funcional y continuidad espaciotemporal, las capacidades y el comportamiento de una entidad formada por partes heterogéneas. Es objeto de disciplinas como la fisiología, la morfología y, en fecha más reciente, la biología de sistemas o biología evolutiva del desarrollo (evo-devo), en las que la organización o autoorganización viviente y los problemas asociados ocupan un lugar destacado. A su vez, la noción de individuo es un concepto teórico para la biología evolutiva, referido a entidades continuas y cohesivas localizadas espaciotemporalmente. Suele denotar objetos que al ser replicados pueden dar lugar a linajes genealógicos (es decir, son replicadores). Como categoría, no se opone a la de organismo (los organismos serían individuos de un cierto nivel jerárquico) sino a la de clase, que en la biología evolutiva de la síntesis moderna se consideraba propia de un pensamiento pre-evolutivo. Las clases ordenan las entidades lógicamente, sobre la base de sus propiedades, y, por tanto, se predican. Los individuos, en cambio, se nombran; genes, especies y organismos serían individuos con nombre propio.

La noción de individualidad puede examinarse desde varios puntos de vista (todos ellos operativos en la biología actual, aunque no unificados): como unidad íntegra, como singularidad única y como autonomía. Las excepciones (quimeras, clones, parásitos) son habituales, por ello habría que reexaminar empíricamente las variedades de individualidad biológica del mundo viviente. Las tres intuiciones sobre la individualidad servirán de hilo argumental en lo sucesivo.

En primer lugar, la individualidad puede concebirse como unidad en el sentido de integridad o no separabilidad. De hecho, este es el significado con el que el término «organismo» fue originalmente acuñado a principios del siglo XVIII, en oposición al mecanicismo, para destacar que ciertos entes, no solo vivientes, están organizados. Hoy día es sinónimo de «ser vivo individual» y se aplica a entidades de todos los reinos vivientes, aunque el concepto se asocia a menudo a propiedades de los metazoos que los entes de otros reinos no poseen.

¿Podría proponerse un concepto de organismo flexible y aplicable a todos



WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO/*LAS DAMAS CHOLMONDELEY*, SIGLO XVII, TATE, LONDRES 2011

los casos problemáticos? Para ello habría que tener en cuenta cuáles son los principios biológicos que crean una unidad organizada, si son evolutivamente convergentes o bien si puede haber formas oportunistas. Si la multicelularidad ha aparecido en diferentes ocasiones y en diferentes taxones podría haber varios procesos que la facilitaran. Así, los ejemplos de simbiosis muestran que lo que ahora es individual e inseparable puede estar constituido por entidades separadas en el pasado. Son sugerentes los trabajos de Kwang Jeon, hoy profesor emérito de la Universidad de Tennessee, con amebas unicelulares que sobrevivieron a una invasión de bacterias, en la que otras amebas perecieron: encontró que no solo las bacterias continuaban viviendo dentro de las supervivientes, sino que al cabo de varias generaciones las amebas ya no podían sobrevivir sin ellas.

En una segunda forma, la individualidad se entiende como singularidad numérica o identidad única y reconocible. En esta idea se basa el concepto teórico de individuo de la biología evolutiva basado en las propiedades de las entidades sujetas a evolución darwinista. Cuando se considera que la identidad única depende exclusivamente del sistema genético, surgen paradojas con respecto al sentido común, pues habría que pensar que ciertos organismos aparentemente individuales, como los dientes de león o los afidios, no son tales por no ser genéticamente únicos: como no se han reproducido por meiosis y fecundación, sino como clones que adquieren intacta la dotación genética de los progenitores, algunos autores piensan que son solo partes de un único individuo evolutivo, que se correspondería con la entidad dispersa en todas sus partes.

Se puede cuestionar si la identidad única de un organismo depende solamente de la dotación genética inicial. Quizá sea moldeada también por diferencias adquiridas durante el desarrollo y ligadas a los sistemas epigenético, hormonal o inmunitario, diferencias que pueden tener repercusiones en la selección. De hecho, la teoría de la evolución se ha empobrecido cuando ha olvidado los rasgos organísmicos de los individuos. Las constantes discusiones sobre las unidades de selección ofrecen prueba de ello: muchos piden que sean tenidos en cuenta los organismos, e incluso entidades de otros niveles (grupos, especies), como unidades sobre las que opera la selección natural. También se reivindica la importancia del organismo con el argumento de que replicar y reproducir son conceptos diferentes. El segundo tiene en cuenta, no solo la copia molecular, sino todo el proceso de división celular (en el caso de los seres unicelulares) y de desarrollo, e incluso el ciclo de vida completo (en el caso de los organismos multicelulares).

El tercer sentido es el que asocia la individualidad con la autonomía y con la agencialidad. Según esta idea, las entidades biológicas actúan en su entorno y se adaptan al mismo transformándolo, como sujetos activos. Para explicar esta capacidad de acción autónoma, se apela a la evolución de la complejidad entendida como una progresiva internalización de los recursos, de forma que el organismo es cada vez más robusto frente al medio. Y con respecto a los demás seres vivos del entorno, la autonomía sugiere cierta independencia del individuo.

Aunque la autonomía constituya un rasgo irrenunciable de ciertas entidades biológicas, es preciso estudiar cómo se combina con la dependencia interactiva entre unidades

Esta tercera concepción de las entidades biológicas (autónomas) plantea varios problemas. Por un lado, depende demasiado del supuesto de que las células serían las unidades biológicas, cuando hay objetos no celulares relevantes en numerosos procesos biológicos. Por otro lado, la perspectiva ecológica subraya la interactividad entre entidades, patente en fenómenos como la transferencia lateral de genes, la simbiosis o el parasitismo. Por ello, en nuestra época post-genómica tendemos a analizar las entidades biológicas como redes complejas, de modo que las clases o las genealogías permiten solo una aproximación a la ontología de lo vivo. Todo ello sugiere que la dinámica ecológica puede a su vez producir nuevas formas de vida. Esto es compatible con la biología de sistemas, que estudia la emergencia de entidades a partir de interacciones entre las partes. Por eso, aunque la autonomía constituya un rasgo irrenunciable de ciertas entidades biológicas, especialmente de los organismos, es preciso estudiar cómo se combina con la dependencia interactiva entre unidades.

Finalmente, deben tenerse en cuenta las aplicaciones prácticas de las categorías. Con respecto a la distinción entre individuo y organismo, la filosofía de la biología encuentra hoy que la noción teórica de individuo empieza a resultar insatisfactoria e insuficiente para referirse a toda la variedad de entidades biológicas, y la de organismo requiere aún más desarrollo; habría que modular en ella la unidad con la interdependencia, y la genealogía con la interactividad ecológica que constituye redes de procesos más que fenómenos clásicos ligados a entidades individuales fijas.

Las tres intuiciones examinadas sobre la individualidad no son conclusivas, pero han de ser tenidas en cuenta. A lo largo de la historia de la filosofía, muchos autores, como Aristóteles o Leibniz, se han preguntado qué son los individuos. Se trata de una cuestión importante que hoy día resurge, desde una perspectiva naturalizada, en las filosofías de las ciencias especiales. En biología se ha concebido la noción de individualidad desde una perspectiva sistémica (organización del organismo), histórica y genealógica (linajes que persisten en el tiempo y en el espacio como individuos). Hoy día crecen las pruebas de que es necesario tener en cuenta también una perspectiva interactiva o ecológica, cuyos datos no siempre se amoldan a las concepciones previas. En adelante, la tarea de definir qué es un organismo individual no será ya *a priori*, sino que dependerá de lo que vayamos sabiendo sobre la evolución y organización de los seres vivos y de otros objetos biológicos.

PARA SABER MÁS

Organisms and their place in biology. K. Ruiz Mirazo, A. Etxeberría, A. Moreno y J. Ibáñez en *Theories in Bioscience*, vol. 119, n.os 3-4, págs. 209-233, 2000.

Varieties of living things: Life at the intersection of lineage and metabolism. J. Dupré y M. O'Malley en *Philosophy & Theory in Biology* (revista en línea abierta), 2009.

Simbiosis. Seres que evolucionan juntos. A. Moya y J. Peretó. Editorial Síntesis, 2011.

The evolution of the individual. P. Godfrey Smith. The Lakatos Award lecture, 2011.

The limits of the self. Immunology and biological identity. T. Pradeu. Oxford University Press, 2012.

por Mark Buchanan

Mark Buchanan, físico teórico, es escritor y columnista de *Nature Physics*. Le interesa el uso de conceptos físicos en la comprensión de la dinámica de fenómenos biológicos y sociales.



Modelos de crecimiento

Entre las ciencias sociales y las físicas

Las controversias en torno a los límites del crecimiento económico se iniciaron hace varios siglos. A comienzos del xix, Thomas Malthus fue el primero en señalar que la especie humana se enfrentaba a limitaciones físicas y biológicas que conllevarían hambre y enfermedades que frenarían su crecimiento. Al no cumplirse esas amenazas, los economistas se fueron confiando.

Más tarde, el movimiento «Los límites del crecimiento» (inspirado por el libro homónimo que publicó el Club de Roma en 1972) prestó especial atención a los costes y las consecuencias (sobre todo ambientales) del crecimiento económico. Mediante sencillos modelos teóricos exploraron posibles escenarios. Sus cálculos sugirieron que si continuábamos creciendo al ritmo de siempre se produciría un colapso socioeconómico en algún momento del siglo xxi. Lejos de ser contestadas, estas preocupaciones fueron ignoradas y acalladas por poderosos economistas e intereses empresariales. Sin embargo, según un estudio de Graham M. Turner, de la Agencia Australiana para la Ciencia, publicado en 2012 en *GAIA*, muchas de las predicciones del libro han resultado bastante acertadas.

Numerosos economistas opinan que la idea de limitar el crecimiento infringe principios teóricos esenciales sobre los beneficios de la innovación tecnológica y el intercambio económico. El debate sobre este asunto entraña un choque de ideas y métodos derivados de las ciencias sociales y físicas, una colisión entre estilos de pensamiento distintos. Si pretendemos comprender el crecimiento, necesitaremos una ciencia que sea física y social a la vez.

En una conversación sobre los límites del crecimiento, el físico Tom Murphy señaló a un destacado economista que el consumo de energía había venido aumentando un 2 por ciento anual durante los tres últimos siglos. Si se mantuviera un crecimiento exponencial de este tipo, tropezaríamos con unos claros límites marcados por la termodinámica. Aun con todas las posibles mejoras en el rendimiento energético, toda la energía consumida acabaría igualmente transformada en un calor que pasaría al ambiente. La energía disipada sería suficiente, según Murphy, para hacer hervir los océanos en tan solo cuatro siglos.

El economista arguyó que quizás habría una manera de continuar el desarrollo sin gastar más energía o, al menos, sin que aumentara tan deprisa su consumo. Quizá logremos hacer un uso más inteligente de la misma. Dado que la actividad económica se está desplazando hacia la producción y el procesamiento de información, puede que hallemos formas de procesar esta con un reducido consumo de energía, de tal modo que se desligue el crecimiento económico del energético.

La conversación dejó ciertas cuestiones en el aire, tales como si sería posible sostener un crecimiento económico perpetuo aun manteniendo fijo el PIB global. Si así fuera, parece que este tipo de «crecimiento» sería muy diferente del que hoy conocemos: ya no tendría vinculación directa con el incremento del gasto energético. En un interesante estudio publicado en 2011 en *Bioscience*, James Brown y otros expertos reunieron datos sobre el crecimiento económico y el consumo mundial de energía entre 1980 y 2003. Observaron que en numerosos países el gasto energético aumentaba a un ritmo menor que el de la producción económica; se apreciaba, en cambio, una mejora progresiva del rendimiento. Es cierto que las economías grandes requieren más energía, pero también la utilizan con más eficiencia que las pequeñas.

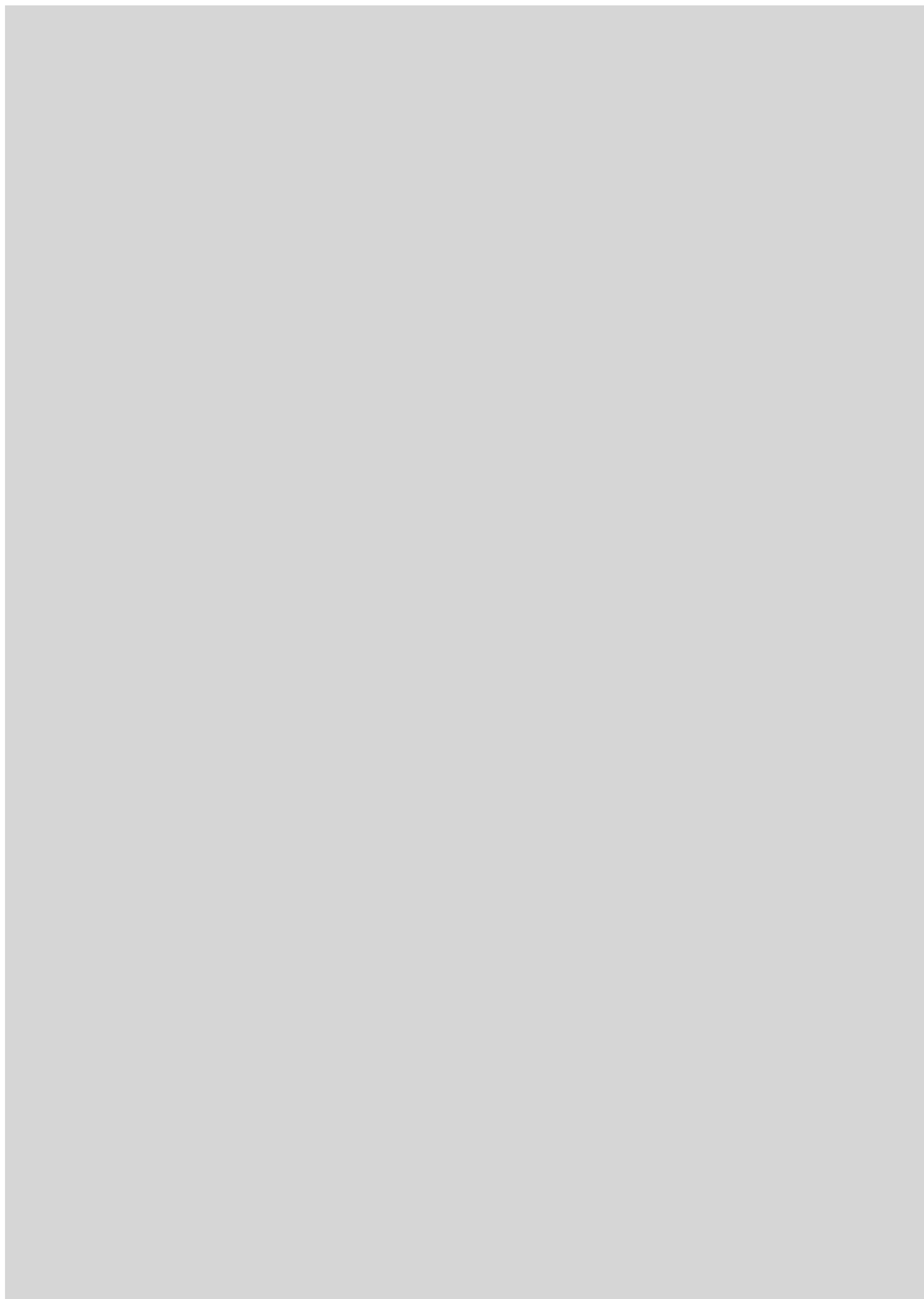
El estudio abarcó 220 países. Las cifras energéticas incluían el consumo metabólico de la población humana, así como toda clase de energía utilizada en la industria, el transporte y cualesquiera otros fines. La representación gráfica de los datos per cápita muestra una relación de escala bien definida, con una notable variación de un país a otro: el consumo de energía aumenta en proporción al PIB elevado a 0,75. Ciertos países (Rusia, Ucrania, China) presentaban menor eficiencia energética; otros (Congo, Hong Kong, Japón), un rendimiento mayor. Andando el tiempo, todos crecían según un patrón parecido.

Curiosamente, ese modelo de progresión guarda una gran semejanza con el que establecen los biólogos para el aumento de la tasa metabólica animal según el índice de masa corporal. Brown y sus colaboradores sugieren que ello podría deberse a que las economías guardan cierto parecido con un metabolismo, por cuanto consumen, transfieren y asignan energía para mantener todas las estructuras y procesos que las sustentan [*véase* «Economía biofísica», por Jesús Ramos Martín; Investigación y Ciencia, junio de 2012]. Revisaron, además, multitud de parámetros relativos a la huella ecológica (electricidad, aluminio y residuos producidos, número de televisores por cada 1000 habitantes) y encontraron que ningún país había conseguido elevar su PIB sin gastar, al mismo tiempo, más energía y recursos naturales, con el consiguiente impacto ambiental.

Parece, pues, que existe una relación natural entre la actividad económica y la energía consumida. Potenciar la actividad exige, en general, consumir más energía (no conocemos ningún país cuya economía haya crecido mientras su consumo energético disminuía). En este sentido, la idea de una economía de la información que lograra desvincularse de un mayor gasto energético sigue siendo más fantasía que realidad.

Quizá sobrevenga alguna transformación tecnológica que reduzca el modelo aquí descrito a una relación propia de una época histórica y de vigencia transitoria. Acaso algún día podremos crecer en la economía y hacer más con menos. Pero, aquí y ahora, no hay nada que sustente esta hipótesis. Creer hoy en un crecimiento ilimitado es lo más parecido a un acto de pura fe.

Artículo original publicado en *Nature Physics*. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2012



ASTROFÍSICA

ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LOS CÚMULOS ESTELARES

Todas las estrellas nacen en grupos, pero después se dispersan lentamente por el espacio. Una nueva teoría intenta explicar cómo estos grupos se forman y se deshacen o, en casos excepcionales, persisten durante cientos de millones de años

Steven W. Stahler



Las Pléyades, un cúmulo de los denominados «abiertos», es uno de los grupos estelares más estables de la Vía Láctea.

Steven W. Stahler es astrofísico teórico de la Universidad de California en Berkeley y coautor, junto con Francesco Palla, de *La formación de las estrellas*, el primer libro de texto exhaustivo sobre la formación estelar (Wiley-VCH, 2004).



EL CIELO NOCTURNO ES UN CAMPO DE ESTRELLAS.

Por todas partes, estrellas tenues y brillantes colman el horizonte. Algunas parecen formar patrones bien definidos que reconocemos como constelaciones. Pero por muy seductores que sean estos diseños, la mayor parte de ellos no son más que meras proyecciones de la mente humana. La gran mayoría de las estrellas, tanto en nuestra galaxia como en otras, no tienen una verdadera conexión física entre ellas.

Al menos, ya no. En realidad, todas las estrellas comienzan su vida en grupo, rodeadas por hermanas de aproximadamente su misma edad de las que, más tarde, se separan. Lo sabemos porque algunos de estos viveros de estrellas, llamados cúmulos estelares, todavía existen. El de la nebulosa de Orión es probablemente el más famoso: en las imágenes del telescopio espacial Hubble, sus estrellas parpadean desde el interior de agitadas nubes de gas y polvo. El de las Pléyades puede verse a simple vista: es una mancha borrosa en la constelación de Tauro.

Los cúmulos estelares presentan una enorme variedad, que abarca tanto frágiles asociaciones con apenas unas docenas de miembros, como densas aglomeraciones de hasta un millón de estrellas. Algunos grupos son muy jóvenes (unos pocos millones de años), mientras que otros datan de los orígenes del universo. En ellos encontramos estrellas en todas las etapas de su ciclo vital. De hecho, las observaciones de cúmulos estelares proporcionaron las pruebas fundamentales en las que se basa la teoría, hoy en día aceptada, que explica cómo evolucionan las estrellas individuales a lo largo del tiempo. La teoría de la evolución estelar es uno de los triunfos de la astrofísica del siglo XX.

Pese a ello, se sabe poco sobre el funcionamiento interno y la evolución de los propios cúmulos. ¿A qué se debe la variedad de formas que se observan? Sabemos mucho más sobre las estrellas que sobre los lugares donde se desarrollan.

La ironía de esta situación se me presentó por primera vez hace 20 años, cuando empecé a escribir un libro de texto de posgrado sobre la formación estelar, en colaboración con Francesco Palla, del Observatorio Astrofísico de Arcetri en Florencia. Por aquel entonces, nos visitábamos con regularidad. Mientras seguíamos los múltiples frentes abiertos en este fructífero campo de investigación, las cuestiones pendientes sobre los cúmulos estelares continuaban rondando por nuestra mente.

Una tarde, durante un descanso en el Caffe Strada —en Berkeley, por supuesto—, me vino a la mente la semilla de una respuesta. Quizá los mismos procesos físicos habían dado forma a todos los cúmulos, independientemente de su edad y tamaño actuales. Y tal vez una única variable podía dar cuenta de cómo esas fuerzas actúan sobre un cúmulo individual: la masa de la nube que lo originó. Reunir las pruebas para corroborar este presentimiento me mantuvo ocupado durante buena parte de las décadas siguientes.

NUBLADO CON POSIBILIDAD DE ESTRELLAS

Cuando empecé este trabajo, los astrónomos ya poseíamos un gran conocimiento acerca de la formación estelar y bastante sobre los tipos de cúmulos en los que se produce. Las estrellas no se materializan de la nada, sino por coalescencia en el interior de inmensas nubes compuestas fundamentalmente por moléculas de hidrógeno, junto con otros elementos y una pequeña proporción de polvo. Estas nubes moleculares se hallan distribuidas por todas las galaxias y cada una de ellas ejerce una atracción gravitatoria: no solo sobre las estrellas y otros objetos fuera de la nube, sino también sobre las distintas regiones dentro de ella. Debido a su propia gravedad, las zonas donde el gas y el polvo son especialmente densos colapsan formando protoestrellas. De esta manera, cúmulos de entre docenas y miles de estrellas pueden surgir de una única nube molecular.

Los cúmulos se pueden clasificar, en general, en cinco tipos, diferenciados en parte por su edad y en parte por el número y densidad de las estrellas que contienen. Los grupos estelares más jóvenes, o cúmulos «incrustados», se encuentran en nubes tan espesas que la luz que irradian las estrellas en las longitudes de onda visibles se halla totalmente oscurecida. Solo vemos el brillo infrarrojo del polvo calentado por las estrellas, pero no podemos discernir los detalles de la estructura de estos cúmulos primitivos, que continúan siendo un misterio.

En el extremo contrario, los cúmulos globulares son los grupos estelares más viejos y populosos. Su edad se remonta al albor de los tiempos y pueden llegar a contener un millón de estrellas estrechamente unidas. Las nubes precursoras de estos cúmulos maduros ya han desaparecido y las estrellas que contienen son visibles en su totalidad. Sin embargo, los cúmulos globulares más cercanos se hallan a cierta distancia del disco de la Vía Láctea y, por tanto, también resulta difícil estudiarlos en detalle.

Así pues, por razones prácticas, mi teoría se restringe a los tres tipos de cúmulos que se dan en el plano de nuestra galaxia y que pueden verse mejor. El más disperso de estos se conoce

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DE NASA, ESA, AURA Y CALTECH

EN SÍNTESIS

Las estrellas se forman en cúmulos, dentro de nubes compuestas de gas mezclado con polvo.

En la Vía Láctea se observan tres tipos de cúmulos, con diferentes estructuras e historias evolutivas.

La masa de la nube que da lugar a un grupo estelar puede explicar estas diferencias a través de su efecto sobre el equilibrio entre la contracción y la expansión del cúmulo.

Únicamente los cúmulos abiertos permanecen intactos después de que la nube original se haya dispersado.

Una causa, tres resultados

Los tres tipos de cúmulos estelares más fácilmente observables de nuestra galaxia comenzaron como una nube difusa de gas y polvo, dentro de la cual se condensaron pequeñas regiones para formar estrellas. El autor propone que un único factor (la masa de la nube original) explica las diferencias en la posterior evolución y estructura del cúmulo (*abajo*). En primer lugar, las nubes se contraen y aceleran la producción estelar a un ritmo determinado por la masa inicial; las nubes de mayor masa se contraen más y generan estrellas con más rapidez. Después, los cúmulos se expanden y las nubes se dispersan total o parcialmente, dependiendo del número y la clase de las estrellas presentes.

Nube inicial | Nube en contracción | Estado observado

Asociación T: Estos cúmulos duran normalmente unos pocos millones de años y contienen cientos de estrellas jóvenes, llamadas T Tauri, envueltas por los restos de la nube original. Probablemente surgen cuando una nube de poca masa se contrae lentamente por acción de su propia atracción gravitatoria, relativamente débil. Esta contracción suave da lugar a un reducido número de estrellas. Los vientos estelares irán reduciendo la nube, lo que provocará que tanto las estrellas como el gas se separen.

Asociación OB: Estos cúmulos permanecen unidos hasta diez millones de años y están compuestos por miles de estrellas densamente agrupadas, incluyendo unas pocas muy masivas, llamadas estrellas de tipos O y B. Para producir un cúmulo así de compacto, la nube original tiene que haber sido extremadamente masiva y haberse contraído muy deprisa. La intensa radiación ultravioleta de las estrellas más masivas acaba por destruir la nube original y el cúmulo se va expandiendo hasta que finalmente se dispersa.

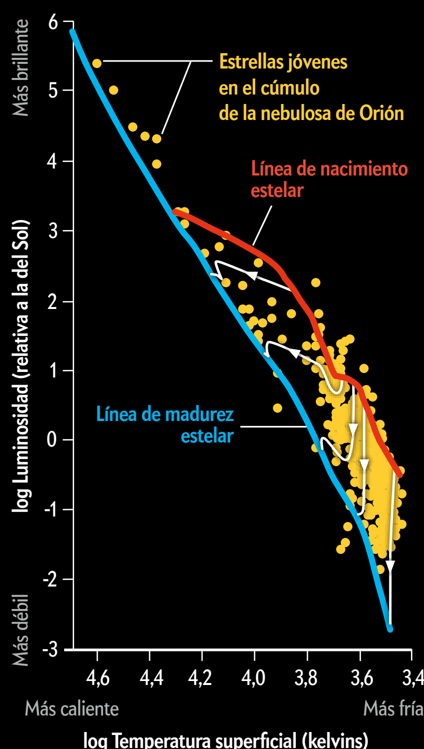
Cúmulo abierto: Es el más duradero de los tres y puede llegar a sobrevivir cientos de millones de años, pero tiene muchas menos estrellas que las asociaciones OB. Estos grupos probablemente surgen cuando una nube de masa intermedia se contrae. Aunque los vientos estelares son capaces de alejar la nube, el cúmulo no se dispersa durante un largo período de tiempo.

MALCOLM GODWIN

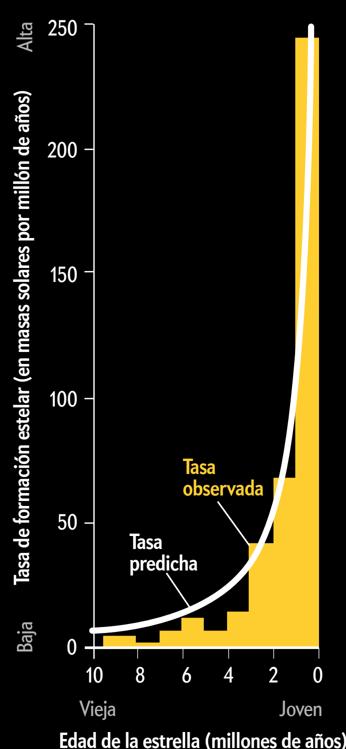
La historia del cúmulo apoya la teoría

Los datos del cúmulo de la nebulosa de Orión, una asociación OB en esta nebulosa (*fotografía*), apoyan la teoría del autor de que la contracción de la nube tiene lugar al inicio de la evolución del cúmulo, provocando que la formación estelar se acelere a medida que aumenta la densidad de la nube original. La formación estelar del cúmulo se interrumpió hace unos cien mil años, pero hasta ese momento la nube original probablemente se había estado contrayendo durante millones de años. Para demostrar que esta contracción ocurrió, el autor determinó, en primer lugar, las edades de las estrellas jóvenes del cúmulo (*puntos amarillos en el gráfico de la izquierda*), que pueden estimarse a partir de su luminosidad y temperatura. En general, la línea roja representa estrellas muy jóvenes que acaban de hacerse visibles en las longitudes de onda ópticas; estas estrellas se van haciendo más calientes y más tenues, de una manera predecible, conforme envejecen (*flechas blancas en el gráfico de la izquierda*), hasta que alcanzan la línea azul. De este modo, la posición de la estrella entre la línea roja y la azul nos indica su edad. A continuación, el autor calculó la masa total de las estrellas (relativa a la masa del Sol) en cada grupo de edad de un millón de años, lo que reveló la tasa de formación estelar del cúmulo durante este período (*gráfico de la derecha*). Los resultados indican que la producción estelar se incrementa drásticamente con el tiempo, tal y como predicen los modelos teóricos (*línea blanca*).

Las estrellas jóvenes muestran su edad



La formación estelar se ha acelerado





FUENTES: «STAR FORMATION IN THE ORION NEBULA CLUSTER», POR FRANCESCO PALLA Y STEVEN W. STAHLER, EN *ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOL. 525; 1999 (*izquierda*); CORTESÍA DE NASA, HST, C. R. O'DELL Y S. K. WONG (*derecha*)

como asociación T, ya que está compuesto en su mayoría por el tipo de estrella joven más común, llamada T Tauri (nuestro Sol fue una T Tauri en su juventud). Cada asociación T puede contener cientos de estas estrellas, rodeadas, aunque no totalmente oscurecidas, por la nube original. Las asociaciones T no permanecen unidas durante mucho tiempo: las más antiguas que se observan tienen unos cinco millones de años, un abrir y cerrar de ojos desde el punto de vista cósmico.

Los científicos saben desde hace tiempo que la masa de la nube precursora de una asociación T es mucho mayor que la de su progenie estelar. En mi opinión, este rasgo explica el corto período de vida de estos cúmulos. La masa determina la intensidad de la fuerza gravitatoria: cuanto mayor es la primera, más fuerte es la segunda. Así, si la masa de la nube original de una asociación T es mucho mayor que la de las estrellas que la componen, la gravedad de la nube (y no la gravedad que las estrellas ejercen unas sobre otras) ha de ser lo que mantiene unido al cúmulo. Y si la nube se evapora, las estrellas se dispersarán. Se cree que los vientos estelares (chorros de gas expulsados violentamente por las estrellas) acaban por desgarrar la nube original de una asociación T, liberando las estrellas previamente ligadas por el espacio.

El segundo tipo de grupo estelar fácilmente observable en la Vía Láctea recibe su nombre de dos tipos de estrellas excepcionales, designadas O y B, que son las más masivas y luminosas del universo. Estos cúmulos, o asociaciones OB, suelen tener unas diez veces más estrellas que las asociaciones T e incluyen algunas O y B. El cúmulo de la nebulosa de Orión es un ejemplo típico; situado a unos 1500 años luz de distancia, consta de cuatro estrellas muy masivas y unas 2000 estrellas menores, entre ellas muchas T Tauri, y presenta una densidad estelar mayor que cualquier otra región en la vecindad de la galaxia.

Todas las asociaciones OB jóvenes presentan altas densidades similares y surgen de nubes primordiales especialmente masivas. A pesar de la formidable gravedad en estos sistemas, las estrellas de las asociaciones OB más antiguas no se dispersan de forma gradual, sino que salen despedidas hacia el espacio. En las imágenes de asociaciones OB maduras, tomadas con un in-

tervalo de tan solo unas pocas décadas, se observa claramente cómo sus miembros se han separado unos de otros.

Una de las razones para esta rápida dispersión es que las estrellas ya se estaban moviendo a gran velocidad con anterioridad. La intensa gravedad de la nube original las impulsa a desplazarse en órbitas muy rápidas. Las asociaciones OB jóvenes se hallan repletas de estas veloces estrellas, preparadas para escapar del cúmulo en caso de que disminuya la masa de la nube. Y en estas asociaciones, la nube original se halla permanentemente amenazada por la intensa radiación ultravioleta que las estrellas de tipo O y B emiten durante su corta vida. Al igual que nuestro Sol, estos astros obtienen su energía de la fusión nuclear, solo que arden con mucha mayor intensidad. Por ejemplo, una estrella O típica tiene 30 veces la masa del Sol, pero agota su combustible en apenas unos pocos millones de años.

En el transcurso de esa inmolación, la radiación ultravioleta que surge de la estrella ioniza el gas circundante, abrasando la nube original. El gas y el polvo del cúmulo de la nebulosa de Orión brillan a causa de esta ionización, y a medida que la nube arde, su gravedad se debilita. Cuando, finalmente, las estrellas masivas mueren y la nube desaparece, la gravedad del sistema ya no puede sujetar a las estrellas más pequeñas, que se mueven a gran velocidad, y estas salen despedidas con fuerza.

De ese modo, tanto las asociaciones T como las OB se deshacen, bien por desgaste gradual o bien por extinción violenta. El tercer tipo de grupo estelar de la Vía Láctea, mucho menos común, es, sin embargo, extraordinariamente estable. Los llamados cúmulos abiertos poseen hasta un millar de estrellas comunes y persisten durante cientos o incluso miles de millones de años, a pesar de que sus nubes moleculares y la gravedad asociada a ellas han desaparecido hace tiempo.

Las Pléyades constituyen uno de estos cúmulos. Tiene 125 millones de años y su nube original probablemente se dispersó hace 120 millones de años o más. El también famoso cúmulo de las Híades, no muy lejos de las Pléyades en el cielo, tiene 630 millones de años. En los confines de nuestra galaxia encontramos docenas de cúmulos abiertos todavía más antiguos. El M67, un sistema compuesto por unas 1000 estrellas, surgió hace cuatro mil millones de años.

Pero ni siquiera los cúmulos abiertos son inmortales; muy pocos son más viejos que el M67. Se cree que, al final, la gravedad de las nubes moleculares que pasan por sus cercanías acaba por dispersar estos sistemas. Aun así, plantean un molesto problema: en las últimas décadas se ha conseguido explicar de forma satisfactoria cómo la dispersión de la nube original provoca la ruptura de las asociaciones T y OB, pero todavía no se conoce la causa de que las estrellas de los cúmulos abiertos sobrevivan a la dispersión de la nube y permanezcan ligadas durante muchos millones de años.

TIRA Y AFLOJA

Al escribir mi libro, tuve muchas oportunidades de preguntarme acerca de los diversos tipos de cúmulos y me pareció que el misterio de los cúmulos abiertos pertenecía a una clase más amplia de preguntas: ¿por qué nuestra galaxia solo alberga una variedad limitada de agregados estelares?, ¿cómo puede una nube molecular «decidir» qué tipo va a producir?

Consideré las fuerzas que operan en los cúmulos estelares. En conjunto, los estados evolutivos de los tres tipos que decidí estudiar indican dos procesos que se compensan mutuamente: la contracción, debida a la gravedad de la nube original, y la expansión, promovida por los vientos estelares y la radiación ionizante. Todas las nubes productoras de estrellas se hallan sometidas a estas dos influencias opuestas en mayor o menor medida. En el caso de las asociaciones T y OB predomina la expansión; en los cúmulos abiertos, ambas parecen estar en equilibrio, al menos durante la etapa crítica en la que se forman las estrellas.

El equilibrio de fuerzas dentro de una nube, deduje, determina su destino, así como el del cúmulo estelar al que da lugar. Y se me ocurrió que la clave de este equilibrio podría residir en la masa inicial de la nube. Tal y como he explicado, la masa total de una nube determina su gravedad; y esta, a su vez, regula el ritmo de contracción de la nube. La masa determina también el número de estrellas que se producen. Una nube de poca masa se contraería lentamente, causando un incremento gradual en su densidad, que daría lugar a un reducido número de estrellas comunes. Más tarde, los vientos de estas estrellas dispersarían la nube de forma paulatina, revirtiendo la contracción y liberando las estrellas hacia el espacio. Este modelo encaja con lo que observamos en las asociaciones T hoy en día.

En el extremo opuesto, una nube con una masa un orden de magnitud mayor sufriría una veloz contracción, que produciría muchas estrellas nuevas, muy cerca unas de otras. En un momento dado, el núcleo de esta nube alcanzaría una densidad tan alta que surgirían varias estrellas masivas. A continuación, como se observa en las asociaciones OB, la intensa radiación de estas estrellas dispersaría velozmente la nube y las estrellas más rápidas serían expulsadas de la asociación.

Por último, parece probable que exista un intervalo intermedio de masas en el que ambos efectos sean comparables. Estas nubes se contraerían aproximadamente al mismo ritmo al que pierden masa y el resultado sería una nube molecular que contendría una fracción cada vez mayor de estrellas jóvenes, muy unidas, pero ninguna verdaderamente masiva. Incluso cuando los vientos estelares despejasen la nube, la atracción gravitatoria entre estas estrellas tan cercanas sería suficiente para mantenerlas ligadas durante largo tiempo, en una configuración no muy distinta a la que los astrónomos llaman un cúmulo abierto.

CONTRACCIÓN DE LA NUBE

Mi teoría del equilibrio de fuerzas describe cómo la masa inicial de una nube determina la interacción entre contracción y expansión en el cúmulo resultante (y, por tanto, su evolución). Pero, a pesar de que la expansión y dispersión se habían observado de forma directa en las asociaciones OB, no se había encontrado ninguna prueba de que las nubes moleculares se hubieran contraído en algún momento, no digamos ya del modo predicho por mi teoría. Tal contracción debería ocurrir en los primeros estadios de la formación del cúmulo, pero los grupos estelares más jóvenes (los cúmulos incrustados) son difíciles de examinar directamente. Tenía que pensar en algún método de demostrar que los cúmulos más maduros habían experimentado una contracción mucho tiempo atrás.

Me dio una pista el trabajo realizado por Maarten Schmidt, del Instituto de Tecnología de California, a finales de los años cincuenta del siglo pasado. Schmidt observó que la tasa de nacimiento de nuevas estrellas dependía de la densidad de gas circundante. De este modo, deduje, si una nube primordial se hubiera contraído en el pasado, su densidad habría aumentado, y la tasa de formación estelar se habría incrementado. Así pues, mi teoría postulaba una aceleración de la formación estelar en el desarrollo temprano de todos los grupos estelares.

Para comprobar esa predicción, necesitaba un método que me permitiera medir las tasas de formación estelar históricas

en los cúmulos. Afortunadamente, la teoría de la evolución estelar nos proporciona una manera de hacerlo. Entre otras cosas, describe cómo se comportan a lo largo del tiempo las estrellas jóvenes que aún no han iniciado la fusión nuclear (como las de tipo T Tauri). Las estrellas T Tauri tienen más o menos la misma masa que nuestro Sol y son aproximadamente igual de luminosas, pero, en lugar de brillar como consecuencia de la fusión nuclear, irradian el calor que se genera mediante compresión cuando su propia gravedad las hace contraerse. Con el tiempo disminuye la tasa de compresión y aumenta la temperatura superficial. Las estrellas se hacen así más débiles y calientes, siguiendo un patrón predecible a medida que envejecen.

Si conocemos la temperatura superficial y la luminosidad de una estrella T Tauri, así como su distancia a la Tierra, podemos saber cuánto tiempo se ha estado contrayendo y, de hecho, cuál es su edad. Comprendí que el conjunto de las edades de todas las estrellas en un cúmulo revelaría la historia de su formación estelar: cuándo y a qué ritmo se habían formado sus estrellas.

No fue difícil aplicar ese método a los cúmulos estelares cercanos, de los cuales disponemos de todos los datos necesarios. Palla y yo descubrimos que, para todos los grupos que todavía poseen abundantes nubes de gas, la tasa de formación estelar se ha ido incrementando con el tiempo. En el año 2000 publicamos un estudio que mostraba que la tasa de formación estelar en el cúmulo de la nebulosa de Orión se había acelerado durante millones de años antes de que la nube inicial se dispersase. Este descubrimiento nos animó a creer que mi suposición era correcta: probablemente, todas las nubes que dan lugar a los cúmulos se contraen al comienzo de su historia.

En el año 2007 desarrollé, junto con el entonces estudiante de doctorado Eric Huff (hoy en la Universidad estatal de Ohio), un modelo teórico de la nube primordial del cúmulo de la nebulosa de Orión que incluía las fuerzas de contracción y expansión postuladas por mi teoría. En las simulaciones numéricas basadas en este modelo, la nube se contraía, tal y como habíamos predicho. Entonces aplicamos la prescripción empírica conocida como Ley de Schmidt-Kennicutt (deducida de las observaciones de Schmidt y otras muchas posteriores) para calcular cómo afectaba a la tasa de formación estelar local el aumento de la densidad en una determinada región de la nube.

Nuestro modelo indicaba una tasa de formación estelar incrementada, que reproducía la aceleración que habíamos obtenido con Palla a partir de las edades de las estrellas en el cúmulo de la nebulosa de Orión. Este nuevo hallazgo corroboraba la suposición de la teoría del equilibrio de fuerzas de que las nubes primordiales se contraen en las primeras etapas de la evolución del cúmulo.

EXPANSIÓN DEL CÚMULO

Desgraciadamente, los métodos utilizados para medir y modelizar las tasas iniciales de formación estelar en cúmulos como el grupo de la nebulosa de Orión no pueden ser aplicados a los cúmulos abiertos, esos grupos excepcionalmente duraderos que, a pesar de no evidenciar rastros de la nube primordial, permanecen ligados por la gravedad. La mayoría de los cúmulos abiertos son demasiado viejos; su época de contracción y formación estelar (que apenas duró unos pocos millones de años) no es más que una minúscula fracción de su tiempo de vida total. Las herramientas para determinar edades estelares distan mucho de alcanzar la resolución necesaria. Y tampoco podemos simular las nubes iniciales de los cúmulos abiertos; estas se dispersaron hace tanto tiempo que ni siquiera podemos estimar su masa o su comportamiento. Por ahora, las primeras etapas de la evolución de los cúmulos abiertos permanecen inaccesibles incluso a la observación indirecta.

En cambio, es posible modelizar la evolución de un cúmulo abierto cuya nube inicial ya ha desaparecido utilizando las simulaciones de *N* cuerpos. En estas, el ordenador resuelve el complejo sistema de ecuaciones acopladas que describe el movimiento de múltiples objetos bajo la influencia de su mutua atracción gravitatoria. Este enfoque ha permitido estudiar lo que ocurre en los cúmulos abiertos después de la inicial contracción de formación estelar propuesta por mi teoría y ha dado lugar a varios resultados inesperados sobre las fuerzas que determinan la expansión del cúmulo.

Aunque los cúmulos abiertos son extraordinariamente estables, no son estáticos. La atracción gravitatoria entre sus estrellas crea una lenta y constante agitación, a medida que las estrellas en sus órbitas se entrelazan unas con otras como las abejas de una colmena. Los códigos de *N* cuerpos que describen esta danza gravitatoria son tan eficientes que pueden simular la evolución de un grupo de 1200 miembros (como las Pléyades) en un ordenador de sobremesa. Hace años, mi estudiante de doctorado Joseph M. Converse (actualmente en la Universidad de Toledo, EE.UU.) y yo adoptamos esta vía numérica para dilucidar la historia de las Pléyades. Nuestra estrategia consistió en conjeturar una configuración inicial arbitraria para el cúmulo y después dejarlo evolucionar durante 125 millones de años. Luego comparamos los resultados simulados con su equivalente real y modificamos las condiciones iniciales hasta que la simulación de *N* cuerpos produjo un grupo similar al observado.

Los resultados fueron sorprendentes. Aunque permanece unido gravitatoriamente, el cúmulo de las Pléyades se ha expandido, de manera más o menos uniforme, desde que su nube se dispersó. Las estrellas en sus concurridas órbitas se alejan unas de otras a un majestuoso paso constante. Este resultado contradice análisis previos, que predecían que las estrellas de los cúmulos abiertos debían separarse lentamente en un grupo interno, las más pesadas, y en una envoltura externa, las más ligeras. Esta pauta de segregación se denomina relajación dinámica y es la descripción habitual de la evolución temporal de los cúmulos ligados gravitatoriamente como, por ejemplo, los cúmulos globulares. Pero incluso cuando prolongábamos nuestra simulación de *N* cuerpos 900 millones de años hacia el futuro, la expansión continuaba de manera uniforme, mostrando el aspecto que un inflado (pero intacto) cúmulo de las Pléyades tendría con una edad de mil millones de años.

Ese hallazgo apunta a que el análisis clásico pasa por alto algún factor crítico en el equilibrio de fuerzas que determina la evolución del agregado. ¿Qué es lo que causa la expansión uniforme de los cúmulos abiertos? Converse y yo demostramos que la clave reside en las estrellas binarias: parejas de estrellas próximas que orbitan en torno a un centro de masas común y que son bastante frecuentes en los grupos estelares. Las simulaciones llevadas a cabo por Douglas Heggie, actualmente en la Universidad de Edimburgo, a mediados de la década de los setenta del siglo pasado mostraron que, cuando una tercera estrella se aproxima a una de estas parejas, las tres se involucran en una complicada danza, tras la cual la más ligera suele ser expulsada a gran velocidad. Esta estrella interacciona con otros miembros del cúmulo e intercambia su energía con ellos, lo que incrementa las velocidades orbitales de las otras estrellas y produce un «calentamiento» del cúmulo. En nuestras simulaciones de *N* cuerpos, la energía de estos encuentros binarios era la

MECANISMO DE EXPANSIÓN

Un «paso a tres» binario

En las simulaciones numéricas, los cúmulos abiertos continúan expandiéndose lentamente durante cientos de millones de años. El autor propone que esta expansión está impulsada por los sistemas binarios, pares de estrellas que orbitan alrededor de un centro común y que son bastantes comunes en los cúmulos estelares (*abajo*). En primer lugar, una estrella pasa lo suficientemente cerca como para incorporarse al sistema y alterar la órbita de las binarias. Tras un complicado *ballet* gravitatorio, la más ligera de las tres estrellas sale despedida a gran velocidad. La expulsada se encuentra en su camino con otras estrellas del cúmulo y les transfiere su momento. Este intercambio de energía acelera las otras estrellas, que amplían sus órbitas y empujan los límites del grupo más allá en el espacio.



causante de que el cúmulo abierto se expandiera (aunque tan despacio que esta expansión podría pasar fácilmente inadvertida a los astrónomos).

MISTERIOS SIN RESOLVER

Este estudio de los cúmulos estelares aporta pruebas que apoyan la tesis de que la masa original de una nube molecular determina tanto la estructura de un cúmulo como su evolución. El trabajo también abre nuevas rutas para futuras investigaciones. Por ejemplo, hacia maneras de observar la expansión uniforme de los cúmulos abiertos predicha por los trabajos del autor.

Pero estos resultados también ponen de manifiesto la cantidad de cosas que aún no sabemos acerca de los cúmulos estelares. A pesar de los avances en las técnicas de simulación numérica, todavía no tenemos las herramientas necesarias para modelizar el proceso mediante el cual determinadas regiones de las nubes primordiales llegan a ser lo suficientemente densas como para formar estrellas. Además, varias décadas de observaciones en longitudes de ondas de radio e infrarrojas no han sido suficientes para descifrar los movimientos internos dentro de esas nubes. La fase de nacimiento de los grupos estelares, que tiene lugar entre el denso polvo de los cúmulos incrustados, permanece envuelta en misterio.

Aun así, el modelo de equilibrio de fuerzas aquí presentado puede ayudarnos a averiguar más detalles sobre esta fase, así como otros aspectos de la evolución de los cúmulos. Queremos verificar, mediante la combinación de estudios analíticos y simulaciones de N cuerpos, que una nube que pierda masa al mismo ritmo al que se contrae realmente da lugar a un sistema gravitatoriamente ligado, con propiedades similares a las de un cúmulo abierto. También queremos utilizar la modelización para explorar cómo las asociaciones T nacientes pueden revertir el colapso de la nube para después dispersarse por el espacio. ¿Realmente cumplen los vientos estelares la destacada función que actualmente se les atribuye?

El impacto de estas investigaciones se extiende mucho más allá del ámbito de los cúmulos. Aunque el estudio de los grupos estelares de la Vía Láctea ha estado relegado a un segundo plano durante mucho tiempo, su relevancia en otras áreas de investigación afines está aumentando rápidamente. Algunos astrónomos creen, por ejemplo, que el Sol se formó en una concurrida asociación OB y que la cercana presencia de estrellas vecinas perturbó el disco de gas y polvo que había a su alrededor, lo que dio forma a nuestro sistema solar. Las nubes moleculares que engendran los cúmulos también desempeñan una función fundamental en la evolución del medio interestelar y las galaxias en su conjunto. Los cúmulos estelares pueden tener la clave para comprender mejor el universo entero: desde el nacimiento de nuestro sistema solar hasta el pasado y el futuro de todo lo que existe más allá de él.

PARA SABER MÁS

Embedded clusters in molecular clouds. Charles J. Lada y Elizabeth A. Lada en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 41, págs. 57-115, septiembre de 2003.

The Orion nebula: Where stars are born. C. Robert O'Dell. Belknap Press/Harvard University Press, 2003.

The formation of stars. Steven W. Stahler y Francesco Palla. Wiley-VCH, 2004.

The dynamical evolution of the Pleiades. Joseph M. Converse y Steven W. Stahler en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 405, págs. 666-680, junio de 2010.

The birth and death of star clusters in the Milky Way. Steven W. Stahler en *Physics Today*, vol. 65, n.º 10, págs. 46-52, octubre de 2012.

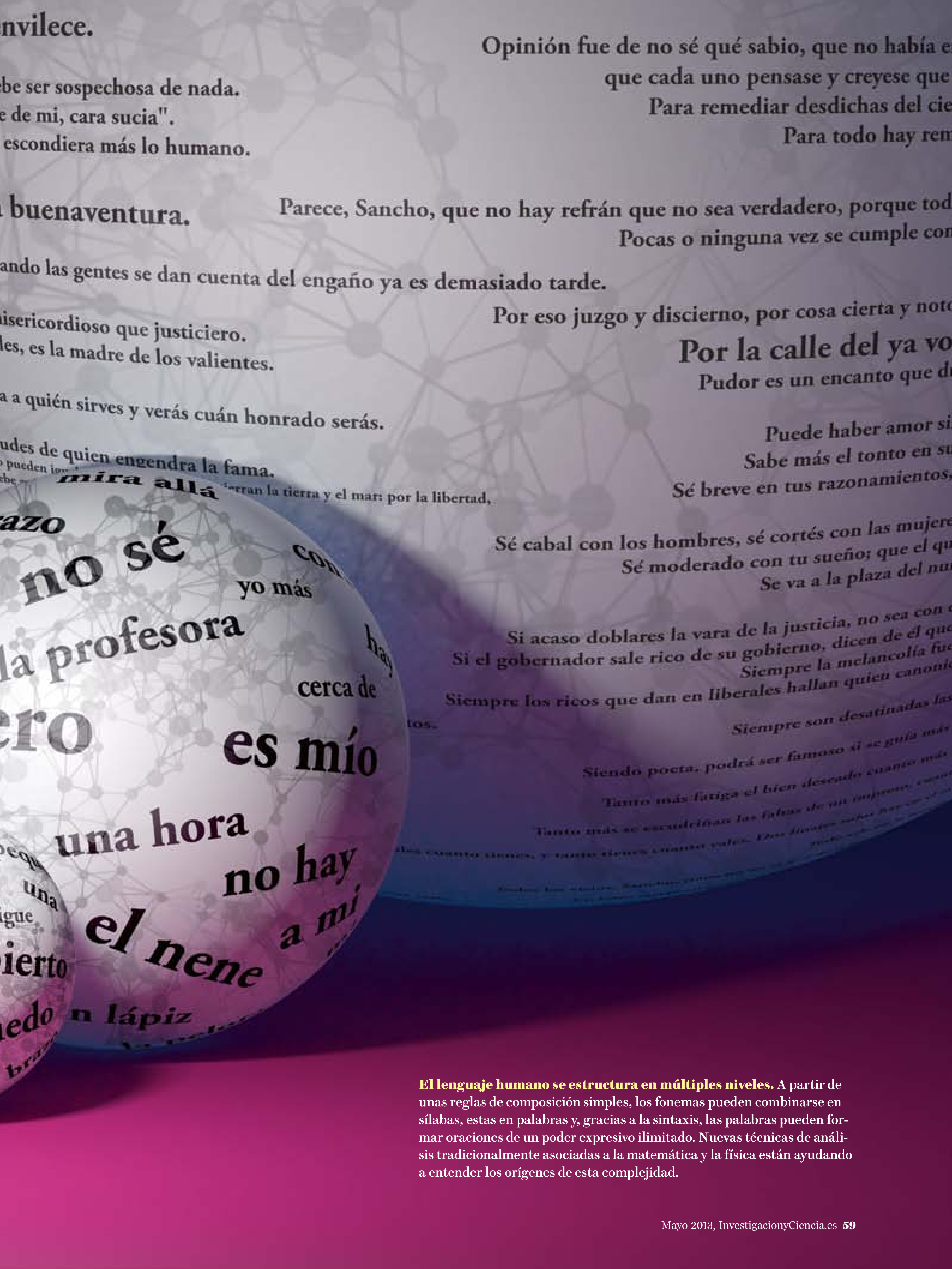


SISTEMAS COMPLEJOS

LENGUAJE, REDES Y EVOLUCIÓN

La teoría de redes y la física de sistemas complejos aportan nuevas pistas sobre los orígenes y la evolución del lenguaje

Ricard V. Solé, Bernat Corominas Murtra y Jordi Fortuny



El lenguaje humano se estructura en múltiples niveles. A partir de unas reglas de composición simples, los fonemas pueden combinarse en sílabas, estas en palabras y, gracias a la sintaxis, las palabras pueden formar oraciones de un poder expresivo ilimitado. Nuevas técnicas de análisis tradicionalmente asociadas a la matemática y la física están ayudando a entender los orígenes de esta complejidad.

Ricard V. Solé es investigador ICREA en la Universidad Pompeu Fabra y miembro del Instituto Santa Fe, en Nuevo México. Sus investigaciones se centran en los orígenes de la complejidad biológica.

Bernat Corominas Murtra investiga en la Universidad Médica de Viena. Estudia los aspectos de la teoría de la información en sistemas complejos y teoría de redes.

Jordi Fortuny es investigador Beatriu de Pinós en la Universidad de Barcelona. Sus trabajos se centran en el estudio teórico de los rasgos de diseño del lenguaje.



El empleo de un sistema de comunicación simbólico capaz de transmitir información compleja constituye un rasgo exclusivo de nuestra especie. Aunque ciertos animales parecen poseer algunos de sus elementos precursores, el nivel de desarrollo del lenguaje humano carece de émulo en el mundo natural. Tampoco existe ninguna máquina que logre siquiera acercarse —aún— a sus extraordinarias cualidades. Para numerosos científicos, fue la aparición del lenguaje lo que cambió para siempre nuestra manera de adaptarnos al mundo; gracias a él, habríamos dejado de ser una especie más para convertirnos en una capaz de transformar el entorno. Pero ¿cómo tuvo lugar la transición desde el protolenguaje hacia el sistema comunicativo complejo y plenamente desarrollado con el que contamos hoy? ¿Qué elementos hicieron posible ese cambio?

Como ha señalado el lingüista Derek Bickerton, el lenguaje no deja fósiles, por lo que para responder a tales preguntas nos vemos obligados a recurrir a datos indirectos. Así, al estudiar los cambios culturales relacionados con el arte o con la fabricación de herramientas a lo largo de la evolución humana, se observan transiciones que parecen obedecer a sucesivas mejoras en nuestras facultades cognitivas y —suponemos— comunicativas. El aumento del volumen del cerebro y de las zonas asociadas al habla ha permitido asimismo inferir posibles transiciones en el grado de complejidad del lenguaje. Durante los últimos años, también la genética ha comenzado a aportar elementos de análisis, como el descubrimiento del gen *FoxP2*, cuya mutación causa trastornos en el habla. Su secuencia genética en los neandertales coincide con la nuestra, lo que sugiere que algunos de los aspectos clave del lenguaje ya se encontraban presentes en aquella especie.

La existencia de tales indicios corrobora otra afirmación de Bickerton: «Nada ocurre en el mundo sin que deje una marca, por sutil e indirecta que esta sea». A lo largo de la historia, el análisis de esas marcas, su naturaleza y sus orígenes (genéticos, culturales, o ambos) ha dado lugar a grandes debates en el ámbito de la lingüística. Estos, sin embargo, han permanecido casi siempre alejados de la ciencia empírica, basada en la validación de hipótesis y la propuesta de modelos teóricos.

Esa situación ha comenzado a cambiar hace poco. Durante los últimos años, la lingüística ha visto nacer un programa de investigación interdisciplinar caracterizado por el empleo de herramientas tradicionalmente asociadas a la matemática y a la física estadística. Entre ellas destaca el análisis de sistemas complejos y la forma en que estos experimentan transiciones bruscas entre sus niveles de organización. En física, llamamos sistemas complejos a aquellos que, formados por un gran número de elementos, exhiben propiedades «emergentes». Estas se caracterizan por el hecho de que, aunque aparecen como consecuencia de la interacción entre los componentes individuales del sistema, no pueden explicarse a partir de la simple «suma» de estos.

EN SÍNTESIS

Durante los últimos años la lingüística ha visto nacer un programa de investigación caracterizado por el empleo de la teoría de redes, la física de sistemas complejos y la teoría de la información.

Esas herramientas han puesto de manifiesto que, a pesar de sus diferencias, las distintas lenguas del mundo comparten ciertos patrones de organización universales y siguen leyes estadísticas comunes.

El estudio de la conectividad de las redes lingüísticas permite explicar numerosos fenómenos, como la polisemia (en apariencia ineficiente, pues introduce ambigüedad) o la organización en categorías semánticas.

Investigaciones recientes sobre la emergencia de la sintaxis en el niño o sobre la capacidad informativa del lenguaje han permitido abordar de manera novedosa el problema de los orígenes del lenguaje.

PÁGINAS ANTERIORES: *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*, SEGÚN DISEÑO ORIGINAL DE RICARD V. SOLÉ Y IOSEBAH SANTIAGO

El lenguaje humano pertenece a esta clase de sistemas. Al igual que un hormiguero no puede describirse como un simple agregado de insectos, tampoco el lenguaje se limita a la yuxtaposición de un conjunto de palabras.

En una serie de trabajos recientes hemos abordado el estudio cuantitativo del lenguaje desde esa perspectiva sistémica. A pesar de que las lenguas del mundo exhiben diferencias notables en su léxico y gramática, todas ellas parecen compartir unos patrones de organización universales y leyes estadísticas comunes. El análisis de esas pautas genéricas nos ha permitido profundizar en varios aspectos relativos a los orígenes de la complejidad en el lenguaje, desde los mecanismos que rigen la adquisición de la sintaxis por parte del niño hasta la caracterización del lenguaje humano como un sistema de comunicación eficiente, flexible y con una capacidad informativa ilimitada.

EL MUNDO PEQUEÑO DEL LENGUAJE HUMANO

A la hora de abordar el problema de la arquitectura del lenguaje, un enfoque nuevo y prometedor se apoya en la teoría de redes, un campo que ha experimentado un desarrollo espectacular durante la última década. La idea esencial consiste en tratar las palabras como elementos básicos, determinar ciertas propiedades que permitan conectarlas y estudiar la estructura del entramado resultante.

A modo de ejemplo, consideremos el conjunto de voces que denotan animales y llevemos a cabo el siguiente experimento: fijaremos un límite de tiempo de algunos segundos y, durante ese intervalo, pronunciaremos los nombres de todos los animales que acudan a nuestra mente. Si el lector lo intenta, tal vez obtenga una lista como:

perro, gato, caballo, delfín, ballena, cachalote...

A medida que el tiempo se vaya agotando, es probable que comiencen a aparecer animales menos comunes y que nos cueste más hallar nuevos ejemplos. En cualquier caso, lo que sí sucederá es que la secuencia generada estará lejos de resultar azarosa. Dos palabras contiguas casi siempre guardan algún tipo de relación, ya sea porque denotan animales de compañía, marinos, o tal vez porque pertenecen a alguna clase poco común en nuestra vida cotidiana, como reptiles o insectos. Para elaborar la lista, nuestro cerebro recurre a asociaciones con un claro sentido semántico: relaciona distintas propiedades (como tamaño, hábitat o familiaridad) y su evaluación en términos de semejanza determina la elección del siguiente animal.

El experimento que acabamos de describir fue llevado a cabo en 2010 por investigadores de la Universidad de Navarra liderados por Joaquín Goñi y Pablo Villoslada, con la colaboración de uno de nosotros (Corominas Murtra). Al repetir la tarea con numerosos sujetos, fue posible obtener una lista cada vez mayor de palabras y trazar una red semántica a partir de las relaciones de significado existentes entre ellas. La organización de la red reveló la presencia de módulos: agrupaciones cuyos elementos se encontraban más conectados entre sí que con el resto de la red. Estos se correspondían con conjuntos de animales clasificables como domésticos, de zoológico, insectos, reptiles o primates, entre otros.

Esa estructura modular refleja con claridad una organización basada en categorías. Pero el experimento mostró algo más: la existencia de «animales puente», aquellos que permiten saltar, semánticamente hablando, de un módulo a otro. Ello introduce un componente muy útil en la red, puesto que contribuye a crear un entramado muy interconectado en el que puede navegarse con facilidad. Algunos de esos nodos puente resultaron ser animales peculiares (como *cocodrilo*, que se percibe de igual modo como «reptil» y como «animal de zoo») o términos más genéricos, como *mono* o *pez*. Aunque este tipo de categorización se observa en otros aspectos de la actividad cognitiva, en este caso puede construirse una cartografía que revela la organización de las categorías.

Más allá de sus propiedades estructurales, ¿qué podemos aprender de tales redes? ¿Cuál es su significado funcional? En el ámbito de la semántica, reviste gran interés la existencia de cierto tipo de ambigüedades aparentemente universales. Aunque en principio sería lógico esperar que cada una de las palabras de una lengua se diferenciase con claridad de cualquier otra, en todos los idiomas existen multitud de términos que poseen un mismo significado, y viceversa: palabras que denotan a la vez varios referentes. Las primeras reciben el nombre de sinónimos; las segundas son las palabras polisémicas.

El fenómeno de la polisemia no deja de resultar sorprendente. A fin de cuentas, el lenguaje constituye un sistema que tiende a favorecer una comunicación eficiente, por lo que, en principio, debería evitar la ambigüedad. Así pues, ¿por qué todas las lenguas presentan polisemia? Si las palabras polisémicas solo supusieran un estorbo, la constante evolución que experimentan los idiomas (mucho más rápida que la genética) las habría eliminado. La respuesta a esta pregunta nos la proporciona, precisamente, la estructura de las redes semánticas.

En 2002, los físicos argentinos Mariano Sigman y Guillermo Cecchi realizaron un descubrimiento clave a partir del estudio de una de las redes de asociación semántica más completas que existen: Wordnet. Este ambicioso proyecto fue iniciado en 1985 en la Universidad de Princeton por el lingüista George A. Miller. Entre otros objetivos, se proponía estudiar la manera en que los seres humanos adquieren y organizan el conocimiento. Sigman y Cecchi emplearon las herramientas de la teoría de redes complejas para llevar a cabo el primer estudio de largo alcance sobre la organización global de Wordnet.

Si se nos presentan las palabras *león* y *rayas*, es muy posible que el vocablo *tigre* aparezca como una forma de asociar ambos términos, en principio inconexos. Así, dadas dos palabras elegidas al azar, podemos plantearnos el juego de intentar conectarlas por medio de una cadena de vocablos intermedios. De esta manera surgirán caminos formados por palabras, cuya longitud podremos medir. Asimismo, los triángulos entre vocablos nos proporcionarán una idea del grado de asociación local entre conceptos: por ejemplo, *luz* y *noche* se relacionan con *lámpara* y también entre sí, aunque de forma distinta a como cada una de ellas lo hace con *lámpara*. No cabe duda de que las conexiones entre los diferentes nodos serán de distinta naturaleza; sin embargo, siempre podremos considerarlas todas simultáneamente para obtener una imagen de la red como un todo organizado en capas. Al estudiar las propiedades de Wordnet, Sigman y Cecchi prestaron especial atención a un fenómeno muy peculiar: el «mundo pequeño».

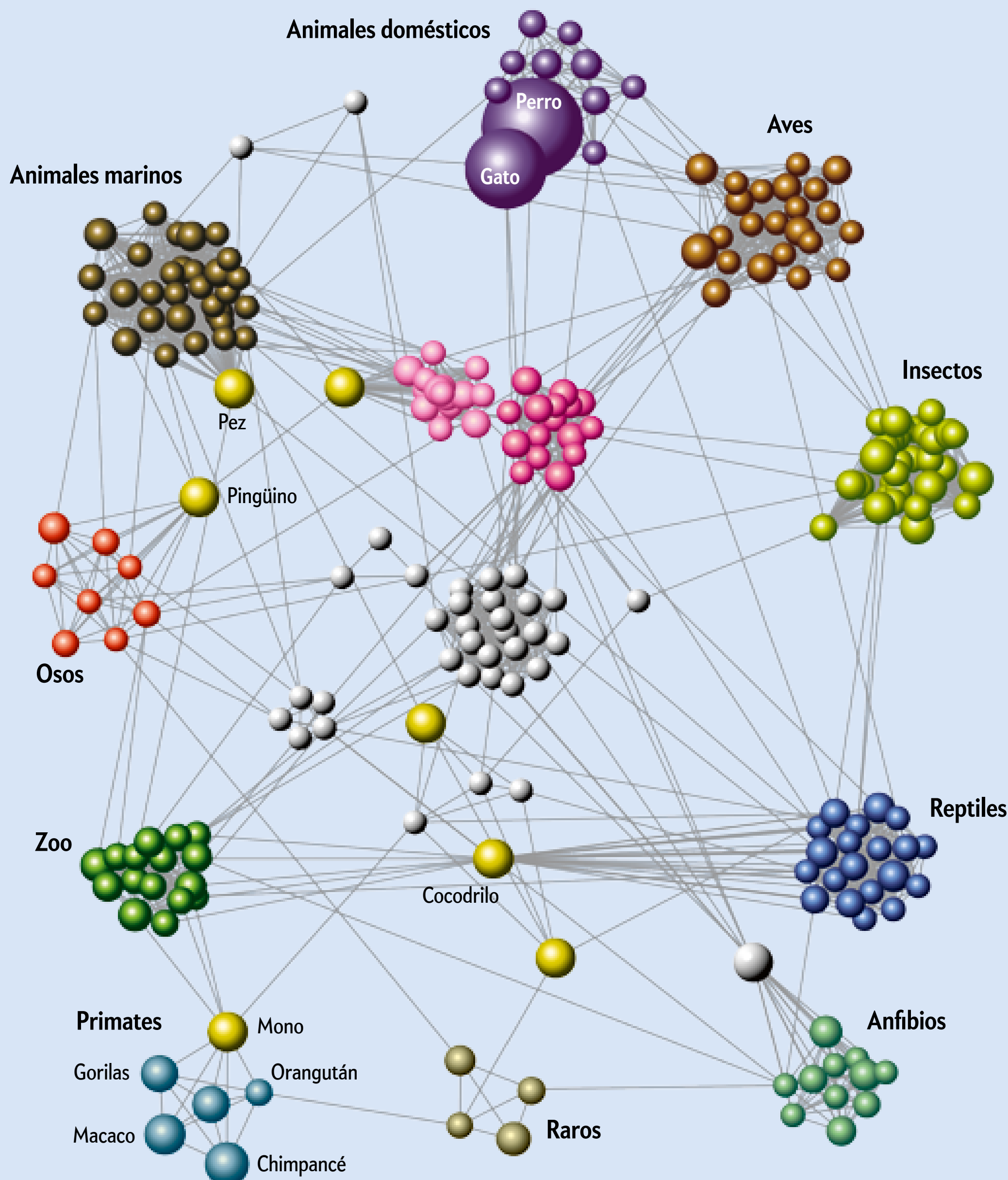
En 1998, los expertos en teoría de sistemas complejos Duncan Watts y Steven Strogatz publicaron un artículo de enorme influencia que arrojaba luz sobre algunas observaciones realizadas unos decenios antes por varios sociólogos, en especial Stanley Milgram, acerca de la aparente cercanía social entre individuos. Para comprender el problema, imaginemos que cada una de las personas que componen una sociedad se corresponde con un nodo de una red. Si dos de ellas se conocen, diremos que están conectadas. De esta manera, podremos vernos a nosotros

Perro, gato, león, jirafa...

El estudio cuantitativo de las propiedades emergentes del lenguaje se basa en la teoría de redes complejas. Para ello, se parte de un grupo de palabras, se consideran las relaciones que existen entre ellas y se analizan las propiedades estadísticas del entramado resultante.

El esquema reproducido aquí se basa en un experimento realizado en 2010 en el que se pidió a un grupo de participantes que enunciaran los nombres de todos los animales que acudían a su mente. El resultado simboliza una red de relaciones semánticas entre términos que denotan animales. En ella se aprecia la existencia de módulos (conjuntos de vocablos más relacionados entre sí que con el resto, *grupos de colores*) y de palabras puente (aquellas que conectan varios módulos, *nodos amarillos*). Estas características facilitan enormemente la navegación por la red, lo cual supone una ventaja a la hora de realizar numerosas tareas cognitivas.

Varios estudios han demostrado que las redes lingüísticas son redes sin escala. Estas se caracterizan por poseer un pequeño número de nodos mucho más conectados que el resto, lo cual permite llegar de un punto a otro con enorme rapidez. En las redes semánticas, estos «superconectores» serían las palabras muy polisémicas, lo cual explicaría la razón de ser de este fenómeno universal (en apariencia ineficiente, dada la ambigüedad que implica).



Tormenta de animales: Las relaciones de significado entre palabras pueden inferirse a partir de las listas de términos que un grupo de sujetos enuncia de manera espontánea, ya que dos palabras consecutivas siempre suelen guardar algún vínculo semántico. El tamaño relativo de los nodos simboliza la frecuencia con la que aparecen las diferentes palabras en las listas dadas por los probandos.

CORTESÍA DE LOS AUTORES. FUENTE: «THE SEMANTIC ORGANIZATION OF THE ANIMAL CATEGORY: EVIDENCE FROM SEMANTIC VERBAL FLUENCY AND NETWORK THEORY», J. GOÑI ET AL. EN *COGNITIVE PROCESSING*, VOL. 12, N.º 2, PÁGS. 183-196, MAYO DE 2011

mismos como elementos de una gigantesca red social. Dados dos individuos, definiremos el grado de separación social entre ellos como el número mínimo de «saltos» que debemos dar para llegar de uno a otro a través de los nodos de la red. Si tomamos dos sujetos elegidos al azar, ¿a cuánto ascenderá su grado de separación promedio?

A partir de una serie de experimentos sencillos basados en el intercambio de cartas postales, Milgram dedujo que la distancia social promedio entre dos habitantes de EE.UU. ascendía a unos seis grados. Por tanto, a pesar de la enorme cantidad de habitantes de un país (del orden de millones), todos nos encontramos mucho más próximos unos de otros de lo que el sentido común parece sugerir. Aparte de en las redes sociales, esta misma propiedad se observa en un gran número de redes de otras clases, desde el genoma hasta los circuitos electrónicos. Este fenómeno, conocido con el nombre de mundo pequeño, resulta esencial para lograr un transporte eficiente de información o de energía a lo largo de una red. Otra característica de las redes de mundo pequeño reside en que poseen un gran número de triángulos: dos elementos que se relacionan con un tercero suelen estar conectados también entre sí.

La red semántica es también un mundo pequeño. Aunque el léxico analizado por Sigman y Cecchi incluía más de 66.000 palabras, la distancia promedio entre dos de ellas ascendía a tan solo siete grados. Además, la red mostraba un número de triángulos muy elevado. El primer resultado refleja la facilidad con la que puede navegarse por la red. La segunda propiedad favorece la libre asociación de conceptos.

Pero Wordnet resultó ser algo más: una red libre de escala. Este tipo de redes se caracterizan por poseer una gran cantidad de elementos con escasos vínculos y, al mismo tiempo, unos pocos nodos enormemente conectados. En 1999, Albert-László Barabási y Réka Albert publicaron uno de los artículos más influyentes en el campo de las redes complejas, en el que demostraban que es justamente la presencia de tales superconectores lo que da lugar al fenómeno de mundo pequeño. Aunque al movernos por estas redes la mayoría de los nodos no nos permitan desplazarnos con rapidez, una vez que alcancemos un superconector dispondremos de una ingente cantidad de posibilidades, por lo que será fácil que a través de alguna de ellas lleguemos pronto a nuestro destino. Por otra parte, la pérdida de superconectores —aunque tan solo se trate de unos pocos— da lugar a una rápida desconexión de la red [*véase* «Redes sin escala», por A.-L. Barabási y E. Bonabeau; Investigación y Ciencia, julio de 2003].

En la red semántica, los superconectores resultaron ser las palabras polisémicas. Uno de los aspectos más interesantes del estudio de Sigman y Cecchi consistió en analizar el impacto de eliminar dichas palabras, en apariencia poco deseables dada la ambigüedad que conllevan. Una vez extraídas, los investigadores calcularon las propiedades de la red resultante. Las consecuencias fueron enormes, pero negativas: la separación media entre palabras aumentó hasta los once grados y el número de triángulos se redujo en un factor de trescientos con respecto a la cantidad inicial.

La polisemia confiere una cohesión extraordinaria a la red semántica, puesto que facilita en gran medida tanto la navegación como la asociación local entre conceptos (medida por el número de triángulos). En lugar de introducir ineficiencias, la ambigüedad facilita sobremanera los vínculos semánticos. Esta bien podría ser la razón por la que todos los idiomas del mundo presentan polisemia. A la hora de ejecutar multitud de tareas cognitivas, nos vemos obligados a navegar a través de un vasto universo de palabras y significados en busca de relaciones entre ellos. ¿Y qué mejor que un mundo pequeño para encontrar aquello que buscamos? Estudios posteriores con otras redes lingüísticas, como las obtenidas a partir de los diccionarios de sinónimos y antónimos, han confirmado estas observaciones.

EL GRAN SALTO

Así pues, la red semántica constituye un sistema organizado en categorías cuyos elementos se hallan interconectados de manera muy eficiente. Sin embargo, el proceso mediante el cual crece dicha estructura y la forma en que esta se halla almacenada en el cerebro representan preguntas aún abiertas.

En este contexto, una cuestión relevante concierne a la manera en que los humanos manejamos ese nivel de complejidad; en particular, al modo en que combinamos o asociamos palabras cuando hablamos. No en vano, uno de los atributos esenciales del lenguaje humano reside en su poder combinatorio. A partir de elementos simples y unas reglas básicas para componerlos, generamos otros más complejos: unimos fonemas para construir sílabas y agregamos estas para formar palabras, en una progresión que explota de manera exponencial cuando alcanzamos el nivel de las frases.

A la hora de estudiar el poder combinatorio del lenguaje, el proceso de adquisición de la lengua materna por parte del niño nos ofrece una ventana única. Ello se debe a que los bebés no «aprenden» las reglas de un idioma en el mismo sentido en que lo haría un adulto, sino que las construyen a partir de los datos dispersos que les proporcionan otros individuos de su comunidad. En el proceso, obtienen una serie de reglas complejas, pero estas nunca son exploradas de forma sistemática mediante una infinidad de ejemplos. Todo lo contrario: el niño participa de una inmersión lingüística necesariamente incompleta, ya que las palabras y frases a las que se ve expuesto nunca pueden cubrir todas las eventualidades del idioma.

No solo la lista de ejemplos que obtiene el niño resulta incompleta, sino que el bebé tampoco recibe ninguna instrucción explícita sobre el uso de las reglas del idioma. De hecho, los adultos poseemos un conocimiento lingüístico fundamentalmente tácito, no explícito. Ningún castellanohablante formularía jamás la pregunta *¿Qué vi el estudiante que contó?*, donde pretendemos que el pronombre interrogativo (*qué*) se interprete con relación al verbo de la subordinada (*contó*). La gramática del español —así como la de la gran mayoría de las lenguas— no permite tales construcciones. Sin embargo, un hablante no es consciente de la estructura que subyace a sus propias producciones lingüísticas. Solo puede aproximarse a ella mediante la elaboración de teorías, al igual que cuando intenta comprender cualquier otro aspecto de la realidad.

Durante los dos primeros años de vida, el niño habrá oído con gran frecuencia ciertas palabras, algunas secuencias comunes formadas por pares de vocablos y un número mínimo de frases (comparado con el universo de combinaciones posibles). Sin embargo, esa limitada exposición a la complejidad de la sintaxis bastará para que, de algún modo, hacia los dos años de edad se produzca una transición inesperada. En torno a los dos años, los niños dejan atrás la «etapa de las dos palabras» (aquella en la que solo combinan pares de términos de forma primitiva) y comienzan una fase nueva y extraordinaria en la que ya pueden construir frases complejas, con muy pocos o incluso con ningún error [*véase* «Primeros pasos en el lenguaje», por D. Bassano; Mente y cerebro n.º 12, 2005]. Esta extrapolación desde unos

pocos ejemplos hacia un conjunto de reglas generales se conoce como problema lógico de la adquisición del lenguaje: ¿cómo es posible lograr un conocimiento tan sistemático, refinado y complejo a partir de un estímulo comparativamente pobre, parcial e incluso repleto de contradicciones?

Resulta muy significativo que el desarrollo de la sintaxis tenga lugar de forma explosiva. Durante la adquisición de la lengua materna, el niño atraviesa una primera etapa en la que solo emplea palabras aisladas. Después, otra en la que ya usa parejas de vocablos. Sin embargo, no existe una «fase de las tres palabras». Al superar la etapa de las dos palabras, la sintaxis infantil ya contiene gran parte de la complejidad de la sintaxis adulta. Podemos decir que en el proceso de adquisición de la sintaxis se produce un salto «de dos a infinito», ya que las reglas generativas del lenguaje adulto son tales que permiten formular oraciones de tamaño ilimitado.

El proceso de adquisición del idioma y sus transiciones han dado pie a algunas de las mayores y más acaloradas controversias. ¿Depende la adquisición del lenguaje de un sistema cognitivo preparado para que esta tenga lugar? ¿O, como plantea Noam Chomsky, existe un «órgano del lenguaje» que posibilita ese salto de lo fragmentado a lo general? El problema de la pobreza de estímulo sugiere la existencia de un componente innato, que los lingüistas han dado en llamar Gramática Universal. Esta guiaría al individuo durante la adquisición del idioma, restringiendo el conjunto de lenguas naturales posibles y proporcionándole los elementos de análisis básicos.

Pero la pregunta relevante no concierne a la legitimidad de tal componente (resulta obvio que el ser humano posee una dotación cognitiva que le permite desarrollar un lenguaje complejo, mientras que un gato no), sino a su contenido y estructura. Una cuestión muy debatida plantea si la Gramática Universal consta de elementos inherentemente lingüísticos o si, en su lugar, se compone de principios más generales. Dado que la sintaxis corresponde a un sistema combinatorio basado en reglas, parece que para afrontar el problema de su adquisición deberíamos considerar, al menos en lo esencial, dicha naturaleza. Por tanto, en lugar de estudiar el número de palabras aprendidas a lo largo del tiempo, tal vez convendría explorar la manera en que estas se relacionan entre sí a medida que el niño las aprende.

REDES Y ADQUISICIÓN DEL LENGUAJE

Emergencia de la sintaxis

Hacia los dos años de edad, los niños pasan de una fase conocida como etapa de las dos palabras (en la que solo combinan pares de vocablos de manera primitiva) a otra en la que ya pueden construir frases completas. Sin embargo, no existe una «etapa de las tres palabras». ¿Cómo se produce esa transición?

▲ Antes de la transición, la red de asociaciones sintácticas presenta una estructura arborescente (*a y b*). La mayoría de las palabras están desconectadas o se relacionan solo por parejas.

a 25 meses

b 26 meses

c 28 meses

▲ Poco después de los dos años, la red sintáctica experimenta una profunda transformación y se convierte en una red libre de escala (*c*). Abundan los vínculos, aparecen varios superconectores (*nodos amarillos*) y el niño ya puede producir frases completas y bien organizadas.

CORTESÍA DE LOS AUTORES (*esquemas de redes sintácticas*); DE: «THE ONTOGENY OF SCALE-FREE SYNTAX NETWORKS: PHASE TRANSITIONS IN EARLY LANGUAGE ACQUISITION», B. COROMINAS MURTRA, S. VALVERDE Y R. SOLÉ EN *ADVANCES IN COMPLEX SYSTEMS* 12, PÁG. 371, 2009 (*a, b, c*)

Para tratar dicha cuestión, en 2009 llevamos a cabo un estudio en el que empleamos la base de datos CHILDES, un gran corpus lingüístico que documenta el proceso de adquisición de la lengua por parte del niño. Los ejemplos típicos de esta recopilación incluyen largos diálogos entre un progenitor y su hijo durante varios meses. A partir de estas conversaciones —caracterizadas por grandes dosis de imitación y redundancia, sobre todo al principio— pueden extraerse las estructuras sintácticas que van apareciendo a medida que el niño crece. Estas, a su vez, permiten conectar las palabras que guardan una relación sintáctica.

¿Constituye el lenguaje humano la única solución al problema de la comunicación compleja o solo una de muchas posibles?

Para llevar a cabo nuestro estudio, a partir de cada producción del niño derivamos primero la estructura de constituyentes, o estructura sintáctica desnuda. Por ejemplo, los constituyentes básicos de la oración *El nene quiere agua* son:

[El nene] [quiere agua].

Después, localizamos el núcleo de cada uno: en el primero (un sintagma nominal), el núcleo es *nene*; en el segundo (un sintagma verbal), *quiere*. De esta manera, ambas palabras aparecerán conectadas en la red, la cual se irá formando por agregación de relaciones similares. Cabe destacar que el lenguaje infantil no suele ser tan transparente, por lo que un análisis riguroso resulta complejo y exige un estudio detallado del contexto de la conversación, entre otros aspectos.

¿Qué ocurre con esa red a medida que el niño adquiere la sintaxis? Como cabría esperar, a los dos años de edad sobreviene una transición que marca el paso de una red poco conectada a otra con un gran número de vínculos. Durante la primera fase, las redes sintácticas son muy reducidas y se parecen a lo que los matemáticos denominan «árboles», con numerosas palabras aisladas de las demás. Tales redes, que indican que las relaciones sintácticas entre términos son aún escasas, reflejan con claridad el hecho de que las producciones del niño apenas constan de más de dos palabras.

Al cruzar el umbral de los dos años, la organización de las relaciones sintácticas experimenta un cambio drástico. Este queda ilustrado a la perfección por la aparición de redes libres de escala: todas las palabras se hallan ahora conectadas, si bien la mayoría lo está con tan solo una o dos, mientras que un conjunto reducido de ellas posee un número de vínculos muy elevado. La riqueza de las conexiones explota y se plasma en una red de mundo pequeño, en la que unos pocos nodos muy conectados (palabras como *un* o *eso*) permiten encontrar con facilidad la relación sintáctica deseada. Algunas de las palabras clave en la sintaxis adulta habrán ganado ya muchas conexiones y no abandonarán el núcleo de la red.

Cabe señalar que en la naturaleza se observan redes de varias clases. Sin embargo, vemos que las lingüísticas —semánticas o sintácticas— comparten la propiedad de ser redes libres de escala y de mundo pequeño. (No obstante, existen diferencias en las leyes matemáticas que las controlan, así como en su grado de modularidad y la naturaleza de sus correlaciones.)

MÍNIMO ESFUERZO

¿Qué sucede durante la transición que acabamos de describir? En ella se observan las trazas de un cambio cualitativo en la manera de generar frases. Hasta llegar a la etapa de las dos palabras, las producciones del niño constan o bien de términos sueltos, o bien de combinaciones de dos vocablos semánticamente complementarios, como nombre-adjetivo o verbo-nombre. Sin embargo, las partículas funcionales (principalmente, artículos y preposiciones) casi no aparecen. Más tarde, la incorporación de partículas funcionales y una mayor riqueza morfológica darán lugar a una gran plasticidad en las producciones del niño. Comienzan así a aparecer nuevas construcciones sintácticas gracias a un proceso de anidamiento de subestructuras que no conoce límite superior. Esta facultad para generar estructuras de tamaño ilimitado mediante procesos sucesivos de anidamiento recibe el nombre de recursividad, una característica que ha sido considerada por la escuela chomskyana como la propiedad esencial del lenguaje humano.

La creación de estructuras mediante el mecanismo de recursividad exige una contrapartida: la capacidad para interpretar esas producciones. En el lenguaje humano, dicha interpretación es composicional. No solo tenemos en cuenta las piezas léxicas que forman parte de un enunciado, sino también las relaciones que existen entre ellas en el contexto de la oración. De forma intuitiva, podemos decir que la interpretación de una frase compleja supera a la «suma» de los significados de las palabras que la componen. Esta competencia para interpretar composicionalmente las estructuras sintácticas generadas mediante procesos de recursividad constituye la base del mecanismo que confiere al lenguaje su enorme poder expresivo. A juicio de numerosos expertos, su aparición a lo largo de la evolución constituye uno de los principales enigmas a los que se enfrenta el estudio de los orígenes del lenguaje.

Con todo, tales observaciones corresponden a una descripción cualitativa del fenómeno, no cuantitativa. Desde un punto de vista más científico, podemos preguntarnos si los patrones estadísticos observados tras la emergencia de la sintaxis resultan compatibles con la hipótesis de que el lenguaje posea una capacidad ilimitada de transmitir información. Por otra parte, deberíamos también investigar por qué se da un salto desde estructuras de solo dos elementos hasta otras con un número ilimitado de ellos.

En 2011 publicamos un artículo que parece sugerir una respuesta afirmativa a la primera pregunta. Consideremos la frecuencia de uso de las palabras de una lengua, la cual puede medirse con facilidad a partir del análisis de textos escritos. Si ordenamos los vocablos según la probabilidad con la que aparecen en un texto obtendremos una distribución conocida como ley de Zipf, así llamada en honor al lingüista George K. Zipf, quien en la década de 1930 la describió por primera vez en el contexto del lenguaje humano. Esta nos dice que la frecuencia $N(r)$ con la que aparece la r-ésima palabra más usada de un texto resulta inversamente proporcional a r. Dicho de otro modo, si la palabra más empleada (de rango $r = 1$) se usa en un texto $N(1)$ veces, la segunda (rango $r = 2$) aparecerá $N(1)/2$ veces, la tercera, $N(1)/3$, etcétera. La ley de Zipf refleja la existencia de unas pocas palabras muy frecuentes, las cuales conviven con una inmensa mayoría de términos «raros».

En nuestro artículo examinábamos una idea propuesta con anterioridad por diversos autores y basada en una conjetura formulada por el propio Zipf. A mediados del siglo pasado, Zipf sugirió la posibilidad de que el lenguaje humano siguiese una «ley de mínimo esfuerzo», la cual afectaría tanto al emisor como al

receptor de un mensaje. Por un lado, un hablante desearía emplear el menor número posible de palabras; ello, sin embargo, obligaría al oyente a realizar un esfuerzo enorme para descifrar el mensaje. Por otro, si el emisor utilizase un repertorio muy amplio e inequívoco, sería demasiado costoso para él. Zipf propuso que la evolución de las lenguas tal vez obedeciese a un principio de compromiso entre ambas posturas. En particular, ello explicaría el hecho de que ningún léxico esté formado por una sola palabra (coste mínimo para el emisor), pero tampoco por tantos vocablos como significados posibles (esfuerzo mínimo para el receptor).

De ser cierta la hipótesis anterior, tales propiedades deberían reflejarse en la estructura estadística del lenguaje; lo que, retomando a Bickerton, constituiría una de las señales dejadas por la evolución. Usando elementos de la teoría de la información para describir los esfuerzos del hablante y el receptor (algo que ya se había hecho con anterioridad), en nuestro artículo de 2011 demostramos que, en todo sistema de comunicación que tendiese a minimizar ambos esfuerzos, la ley de Zipf emergería de forma natural. Además, si suponemos que el lenguaje crece en complejidad a medida que evoluciona y se incorporan nuevos elementos (es decir, que no constituye un sistema estático, sino flexible), resulta posible demostrar que el código menos costoso que muestra una capacidad informativa ilimitada sigue, precisamente, la ley de Zipf.

Por último, el salto de dos a infinito parece necesitar la ley de Zipf como ingrediente clave. En un estudio reciente hemos demostrado que es posible construir un sistema formal de anidamiento de conjuntos en el que, una vez que pasamos de grupos de dos componentes a grupos de tres, el salto a un potencial generativo ilimitado ya ha tenido lugar. En dicho sistema la ley de Zipf resulta un requisito indispensable, ya que combina precisión (múltiples palabras poco probables y de uso específico) y ambigüedad (pocas palabras muy frecuentes y de uso genérico) de acuerdo con una ley muy bien definida. Si bien este marco teórico es aún muy abstracto, sugiere con fuerza la idea de que una gran parte de la transición observada en el proceso de adquisición de la lengua obedece a un principio organizativo fundamental que nuestro cerebro habría alcanzado en el curso de la evolución.

LENGUAJES SINTÉTICOS Y EVOLUCIÓN

Al investigar los orígenes de la complejidad del lenguaje, no podemos pasar por alto otras escalas de organización ni, en particular, el papel desempeñado por la evolución cultural. Los idiomas sufren cambios notables en una escala de tiempo mucho menor que la que caracteriza a la evolución genética. Si tomamos un texto en nuestra lengua materna escrito hace apenas unos cientos de años, descubriremos gran cantidad de arcaísmos e incluso experimentaremos dificultades para comprenderlo. Así pues, parece que deberíamos tener en cuenta el cambio lingüístico a lo largo del tiempo. Esta idea se antoja también difícil de explorar, dado que la evolución de los modos culturales escapa a nuestra capacidad de experimentación. Con todo, una nueva generación de investigadores ha sabido sacar partido de la simulación por ordenador para remedar el camino que conduce al lenguaje.

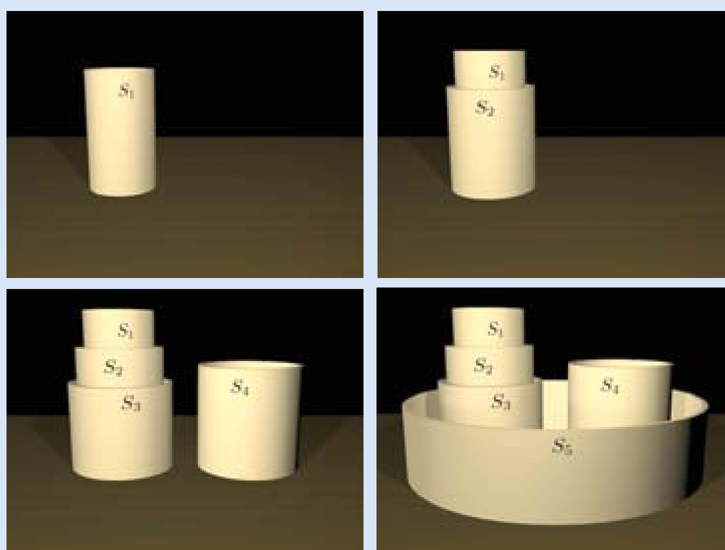
Bajo la estela de su principal precursor, el lingüista Jim Hurford, diversos autores, como Simon Kirby o Morten Christiansen, han llevado a cabo experimentos virtuales en los que una

RECURSIVIDAD Y COMPOSICIONALIDAD

Poder expresivo sin límites

Uno de los rasgos definitorios del lenguaje humano estriba en que las reglas que rigen la sintaxis permiten crear estructuras de tamaño, a priori, ilimitado. Esta característica recibe el nombre de recursividad. La figura representa de manera esquemática la estructura de la oración *El niño juega a la pelota* en cinco constituyentes:

S_1 = [la pelota]
S_2 = [a [la pelota]]
S_3 = [juega [a [la pelota]]]
S_4 = [El niño]
S_5 = [[El niño] [juega [a [la pelota]]]]

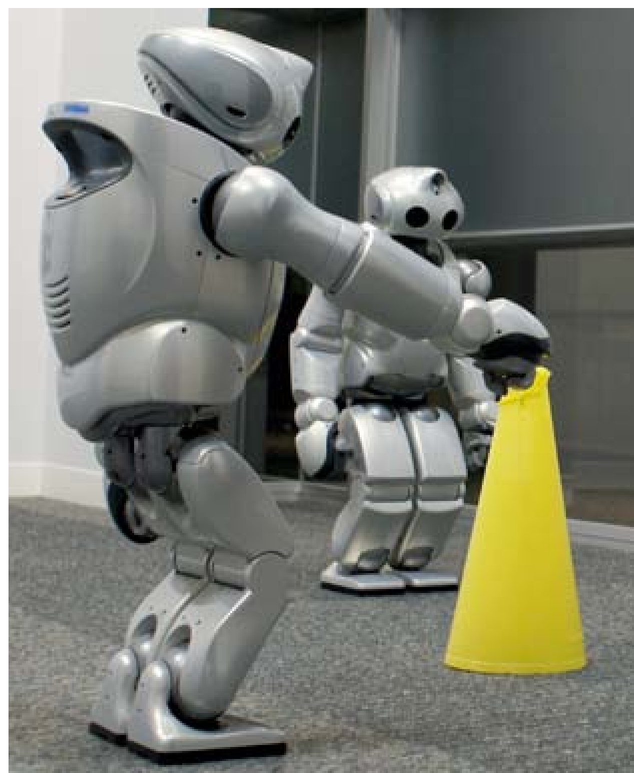


A su vez, estos han sido construidos a partir del anidamiento de otros constituyentes, lo cual nos permite llegar a las estructuras de menor tamaño: las piezas léxicas *la*, *pelota*, *a*, *juega*, *el*, *niño*. Al mismo tiempo, la oración puede actuar como constituyente anidado en una estructura superior; por ejemplo, como subordinada en *He visto que [el niño juega a la pelota]*.

En principio, podemos alargar la oración tanto como deseemos. Es más, cada frase adicional transmitirá un significado nuevo que irá más allá de la «suma» de los significados de los constituyentes. Esta propiedad se denomina composicionalidad. Recursividad y composicionalidad confieren al lenguaje su enorme poder expresivo. Sin embargo, pese a su importancia y a los esfuerzos realizados durante décadas por investigadores de diversas disciplinas, la forma en que el cerebro implementa ambas propiedades resulta, hoy por hoy, totalmente desconocida. Este es, probablemente, el mayor reto al que se enfrenta nuestra comprensión del lenguaje.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

«*Bozopite*, pásame la *malewina*»: El lenguaje puede evolucionar en sistemas robóticos. Los autómatas del investigador Luc Steels (*fotografía*) aprenden del entorno e inventan palabras para referirse a los objetos. Mediante procesos de ensayo y error, un grupo de robots puede desarrollar un léxico común y una gramática simple.



CORTESÍA DE LUC STEELS: LABORATORIOS SONY, PARÍS

población de «agentes» capaces de intercambiar y procesar palabras desarrollan algunas propiedades características del lenguaje. Algunos de los modelos de Kirby muestran que ciertas reglas de ordenación de palabras surgen —se «descubren»— de manera espontánea como resultado de la evolución. Kirby y otros investigadores, como Terrence Deacon, sospechan que el lenguaje ha evolucionado para sobrevivir en un ambiente definido por la naturaleza del cerebro humano. En estos modelos, se considera al lenguaje como un virus que infecta la mente del niño y que, por tanto, actuaría como una entidad simbiótica: los humanos necesitaríamos el lenguaje para prosperar o incluso para sobrevivir, mientras que el lenguaje dependería de nosotros para reproducirse. Aunque esta hipótesis resulta muy atractiva, nos dice poco sobre el problema de fondo: qué procesos rigen la evolución del lenguaje.

¿Descubriremos alguna vez el origen del lenguaje humano? ¿Constituye su estructura la única solución al problema de la comunicación compleja o tan solo una de muchas posibles? Podría argumentarse que esta pregunta carece de sentido. Dado que el lenguaje no deja fósiles, jamás podremos reconstruir el camino que ha seguido a lo largo de millones de años. Sin embargo, dos enfoques novedosos podrían ayudar a resolver la cuestión.

El primero se basa en la existencia de ciertas pautas universales en la evolución hacia la complejidad. Aunque las lenguas del mundo exhiben diferencias importantes en su léxico y reglas gramaticales, la presencia de patrones de organización generales (como la ley de Zipf o la emergencia de redes de mundo pequeño y libres de escala) sugieren que el lenguaje humano constituye una solución única al problema de la comunicación segura pero a la vez flexible. De ser así, podríamos definir, al menos a grandes rasgos, el camino seguido por la evolución hasta hoy.

La segunda posibilidad consiste en hacer evolucionar formas de lenguaje en sistemas robóticos. En este contexto, el empleo de agentes artificiales añade una dimensión especialmente interesante al debate. En lugar de construir modelos del lenguaje humano, quienes investigan en este campo emplean robots equipados con sensores y un «cerebro» muy simple, como una red neural [*véase* «¿Dónde están los robots parlantes?», por J. K. Hartshorne; Mente y cerebro n.º 57, 2012]. Una versión estándar de este tipo de sistemas nos la proporcionan los experimentos de Luc Steels, experto en inteligencia artificial de los Laboratorios de Ciencias de la Computación Sony de París y del Instituto de Biología Evolutiva de Barcelona. Steels empleó dos sistemas robóticos sencillos, equipados de visión y facultados para observar un conjunto de objetos y asignarles nombres. Estas «cabezas parlantes», como se llamó al primer experimento, podían comunicarse entre sí e intercambiar información sobre los objetos del entorno y sus propiedades.

Steels intentaba con ello recrear los (posibles) primeros pasos del lenguaje. Sus robots debían segmentar la información relativa a cada objeto, como su color o localización en el espacio, y elegir un nombre para denominarlos. Los términos empleados eran palabras inventadas, como *bozopite* o *malewina*, por lo que durante el proceso de comunicación cada robot intentaba deducir a qué objeto o atributo hacía referencia su compañero. De tanto en tanto, de este intercambio de información surgía el acuerdo y ambas máquinas comenzaban a emplear el mismo término. Al final, los robots generaban un gran número de palabras para indicar orientaciones espaciales (arriba, abajo, etcétera) y otros atributos, como color o tamaño. Un resultado de este tipo de experimentos «evolutivos» es la aparición de categorías de significado. En otros estudios con robots más avanzados se observó también la emergencia de una gramática rudimentaria como respuesta a situaciones ambiguas.

Un aspecto importante de tales trabajos consiste en descubrir la importancia de la interacción física del robot con el medio externo y la percepción que el autómata tiene de sí mismo y de los demás dentro del espacio. ¿Qué tipo de lenguajes aparecerán cuando se empleen robots más complejos? ¿Surgirá uno parecido al nuestro —lo que apuntaría a la existencia de leyes universales— o asistiremos a la creación de una forma completamente nueva de lenguaje?

PARA SABER MÁS

El lenguaje humano. Colección *Temas de Investigación y Ciencia* n.º 5, 1996.
Redes complejas. Ricard V. Solé. Tusquets, Barcelona 2009.
The ontogeny of scale-free syntax networks: Phase transitions in early language acquisition. Bernat Corominas-Murtra, Sergi Valverde y Ricard V. Solé en *Advances in Complex Systems*, vol. 12, págs. 371-392, 2009.
Language networks: Their structure, function and evolution. Ricard V. Solé, Bernat Corominas-Murtra, Sergi Valverde y Luc Steels en *Complexity*, vol. 15, págs. 20-26, 2009.
Diversity, competition, extinction: The ecophysics of language change. Ricard V. Solé, Bernat Corominas-Murtra y Jordi Fortuny en *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 7, págs. 1647-1664, 2010.
Emergence of Zipf's law in the evolution of communication. Bernat Corominas-Murtra, Jordi Fortuny y Ricard V. Solé en *Physical Review E*, vol. 83, art. 036115, 2011.
Adiós al principio modular del lenguaje. I. B. Schlesewsky y M. Schlesewsky en *Mente y cerebro* n.º 53, 2012.

Eberhard Knobloch estudió matemáticas, filología clásica e historia de las ciencias exactas y de la técnica en la Universidad Libre de Berlín y en la Universidad Técnica de Berlín. Entre 1976 y 2008 dirigió los trabajos de edición de la obra matemática de Leibniz. Desde 2001 dirige la edición de los escritos sobre ciencias naturales, medicina y técnica.



HISTORIA DE LA CIENCIA

El arte de editar a Leibniz

Quien tal vez fuera el último sabio universal apenas publicó nada en vida. Tres siglos después de su muerte, gran parte de la obra de Leibniz aún debe ver la luz

Eberhard Knobloch

«Si uno se vuelve hacia sí y compara los talentos propios con los de un Leibniz, se sentirá tentado de arrojar los libros para ir después a morir, en silencio, a algún oscuro y oculto rincón del mundo». Tales palabras dedicaba el enciclopedista Denis Diderot al historiador, teólogo y filósofo alemán Gottfried Wilhelm Leibniz. Cuando este doctor en derecho, natal de Leipzig e hijo de profesor universitario, falleció en Hanóver en 1716, su patrono, el duque de la ciudad, apenas reaccionó. Habría de ser otro francés, Bernard Le Bovier de Fontenelle, secretario vitalicio de la Academia de las Ciencias gala, quien reivindicase la obra del genio y compusiese en su honor una brillante necrológica.

No es de extrañar que, en 1758, más de cuarenta años después de la muerte de Leibniz y un año después de la de Fontenelle, Diderot sostuviese lo siguiente: «Tal vez ningún hombre haya leído, estudiado, meditado ni escrito jamás tanto como Leibniz. Resulta asombroso que Alemania, a quien este hombre ha honrado tanto como Platón, Aristóteles y Arquímedes juntos a Grecia, aún no haya recopilado todas las palabras que brotaron de su pluma». Sin duda, si en Alemania existiese un panteón como el que se alza en París con el lema «A los grandes hombres — La patria agradecida», los restos de Leibniz descansarían hoy en él. En su defecto, el homenaje se limita a depositar cada 14 de noviembre, el aniversario de su muerte, una corona de flores junto a su tumba, en la iglesia de San Juan de Hanóver.

EN SÍNTESIS

Gottfried Wilhelm Leibniz es considerado el último sabio universal de la historia de la humanidad. Sus contribuciones abarcaron todas las ramas del saber, desde el cálculo diferencial hasta la lógica, la teología, la filología o el derecho.

Leibniz fue también un prolífico inventor. Ideó la notación binaria que hoy emplean los ordenadores, concibió un anemómetro, planos para un submarino o los rodillos dentados escalonados para construir una calculadora mecánica.

Sin embargo, el pensador apenas publicó en vida una parte ínfima de su obra. Trescientos años después de su muerte, solo una fracción de sus miles de escritos ha visto la luz. Los investigadores esperan completar este trabajo en las próximas décadas.

SALVO INDICACIÓN CONTRARIA, TODAS LAS IMÁGENES DE ESTE ARTÍCULO PROCEDEN DE LA BIBLIOTECA GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ – BIBLIOTECA DEL ESTADO DE BAJA SAJONIA – HANÓVER



Un genio con una abultada peluca: Leibniz, a la edad de 56 años, en un retrato de A. Scheit (1703).

Pero aún hoy habremos de esperar algunos decenios para ver la primera edición completa de la obra de Leibniz. ¿A qué tanta demora por parte de Alemania en rendir tributo a uno de sus mayores héroes intelectuales? ¿Acaso no han logrado lo propio los holandeses con Huygens, los daneses con Tycho Brahe, los italianos con Galileo o los franceses con Descartes?

La respuesta se halla en una carta que Leibniz remitió en 1697 al matemático suizo Jakob Bernoulli, ocho años menor que él. Con gran arreglo a la verdad, en ella confesaba lo siguiente: «He escrito incontables cosas sobre incontables asuntos, pero publicado muy poco sobre muy pocos de ellos». Durante su vida, el cortesano de Hanóver solo llegó a publicar una obra extensa: su *Teodicea*, o *Estudios de teodicea sobre la bondad de Dios, la libertad del hombre y el origen del mal* (1710). Las primeras ediciones francesas de otros escritos filosóficos de envergadura, como el *Discurso sobre metafísica* (1686), los *Nuevos ensayos sobre el entendimiento humano* (1704) o la *Monadología* (1714), no aparecerían hasta 1846, 1765 y 1840, respectivamente. Su tratado matemático de mayor amplitud, *Cuadratura aritmética de la circunferencia, la elipse y la hipérbola, de la que se sigue una trigonometría sin tablas*, más de cien páginas impresas sobre los fundamentos de la geometría infinitesimal, no vio la luz hasta 1993.

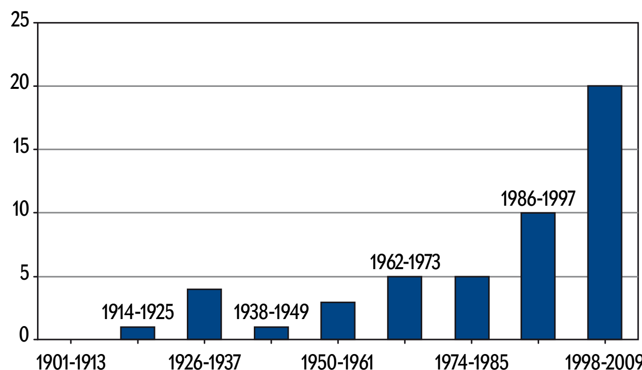
DOSCIENTAS MIL HOJAS EN SIETE LENGUAS

Una edición de sus *Obras completas y correspondencia* deberá aún darnos a conocer su grandioso legado, excepcional desde cualquier punto de vista. El hecho de que la mayor parte de su trabajo se haya conservado hasta nuestros días debemos agradecérselo a una circunstancia política. Leibniz había estado al servicio del príncipe elector de Hanóver (desde 1714, rey de Inglaterra), el duque de Wolfenbüttel, el rey prusiano de Berlín, el emperador de Viena y el zar de San Petersburgo; por lo que, a su muerte, la corte de Hanóver selló de inmediato su obra. De esta manera, se aseguraba de que jamás saliese a la luz ningún asunto comprometido que Leibniz hubiera decidido hacer constar por escrito.

El legado intelectual de Leibniz alcanza proporciones descomunales: unas 15.000 cartas dirigidas a más de 1100 corresponsales y unos 50.000 tratados, esbozos y extractos que llenan en torno a 200.000 hojas y unos 100 volúmenes con anotaciones. Leibniz redactó sus escritos y cartas preferentemente en latín (en torno al 40 por ciento), francés (30 por ciento) y alemán (15 por ciento), y, en menor proporción, también en inglés, holandés, italiano o ruso. El contenido de sus apuntes abarca todos los ámbitos del conocimiento: el conjunto de las ciencias humanas y naturales del siglo XVII y principios del XVIII, la técnica y la teología. Se trata de la herencia de un pensador que proclamaba y practicaba la universalidad del saber como ningún ser humano podría hacerlo hoy.

Todo lo anterior deja patente cuánta riqueza se halla a nuestro alcance, pero también la monumental cantidad de trabajo que aguarda a los editores. El proceso de catalogación de la obra de Leibniz no comenzó hasta 1901. Poco a poco, comenzó a traslucir la magnitud de una tarea que, incluso decenios después, continuaba infravalorándose. En 2007, la correspondencia de Leibniz que atesora la Biblioteca Gottfried Wilhelm Leibniz, en Hanóver, fue declarada patrimonio documental de la humanidad por la UNESCO (si bien no así el resto de sus manuscritos). La gran importancia de esas cartas no solo se debe al gran número de príncipes y eminentes científicos de la época que figuraban entre sus corresponsales, sino a que en ellas Leibniz exponía sus opiniones e ideas de un modo óptimo: a través del diálogo. Así, fue solo en su intercambio epistolar con Samuel Clarke, portavoz de Newton, donde Leibniz defendió su concepción relacional del espacio y el tiempo frente a las entidades absolutas que reivindicaba el autor de los *Principia*.

La serie de ediciones comenzó en 1768 en la ciudad de Ginebra, con la publicación de una *Opera omnia* en seis volú-



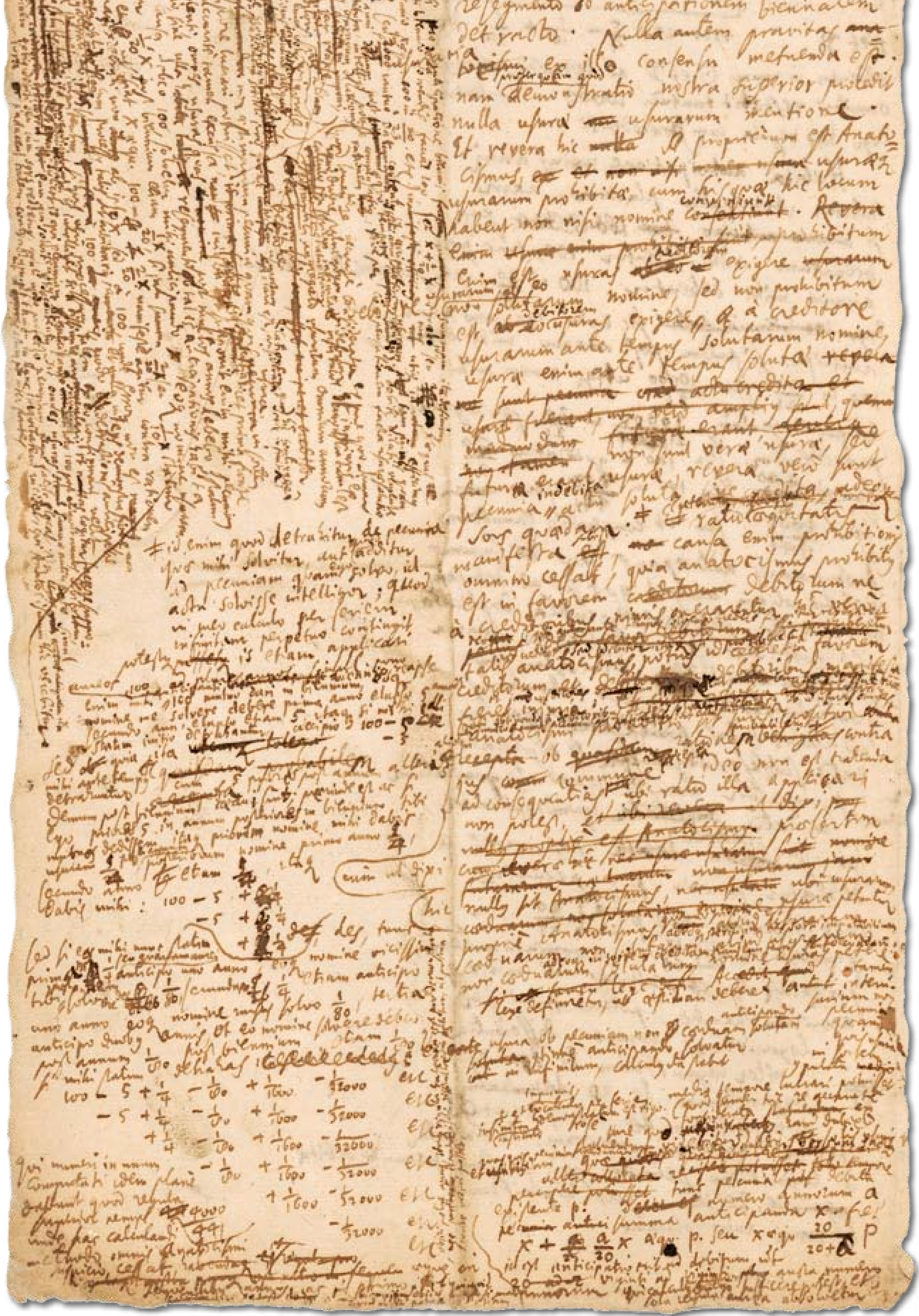
La evolución de la labor en la edición de la obra de Leibniz queda reflejada en esta curva. Solo durante los tres últimos decenios ha cobrado cierto impulso la publicación de su legado.

Matemática financiera

Leibniz gustaba de llamarse a sí mismo *Pacidius*, un pacificador que deseaba contribuir como filósofo, consejero político y matemático a la prosperidad pública. Como tal, consideró problemas sociales y políticos aún vigentes, como el de la deuda soberana o el cálculo justo de las rentas. Entre otros asuntos, se preocupó por lograr un entendimiento cabal del riesgo; es decir, hallar un sistema de seguros con fundamento matemático.

A menudo, un individuo aislado no es capaz de asumir un riesgo que, sin embargo, una comunidad de asegurados sí puede afrontar con comodidad. Al soberano también le interesa que sus súbditos no pierdan bienes ni haciendas a causa del fuego o las catástrofes, pues quien nada tiene tampoco puede pagar impuestos. Por ello, un gobernante debería fomentar la creación de un sistema de seguros como el que comenzó a aplicarse durante la época de Leibniz. La compañía de seguros VGH, de Hanóver, fundada en 1750 y nacida de aquella tradición, sufragó en el año 2000 los costes de la primera edición de los escritos de Leibniz sobre matemática financiera y de seguros. En ella figuraba su cálculo para la tasa de descuento y el valor actualizado de un importe. Realizado en 1683, este indica cuánto debe descontarse de una deuda cuando una parte se amortiza con antelación. Hasta entonces, el derecho sajón prescribía una manera incorrecta de calcularlo.

Leibniz también se ocupó del abono de las rentas a un asegurado, lo que hoy podríamos denominar pensiones. Dado que la duración del pago depende de la esperanza de vida de la persona, desarrolló modelos probabilísticos para calcular las retribuciones de individuos y sociedades. Aunque nunca publicó sus trabajos al respecto, Leibniz puede ser considerado uno de los precursores de la matemática financiera y actuarial.



Leibniz no se recataba en escribir incluso en los últimos márgenes de un pliego. En aquella época, el papel era caro. Por desgracia, rara vez databa sus escritos. En la parte inferior de este facsímil se encuentra el cálculo del valor actualizado de una suma de dinero, realizado por Leibniz hacia 1683 (facsímil del manuscrito LH II,5,1 hoja 16v).

menes a cargo de Louis Dutens. En realidad, el título («obras completas») solo hacía referencia a los escritos ya publicados y accesibles a Dutens, escritor y académico. Quienes en el siglo XIX editaron recopilaciones análogas fueron en este punto algo más prudentes, aun cuando estas ya incluyesen escritos póstumos. Así, Louis Alexander Foucher de Careil tituló sus siete tomos con un parco *Obras* (1859-1875). Lo mismo hizo el historiador Onno Klopp con sus once volúmenes (1864-1884), una recopilación de textos que llevaba por subtítulo *Serie primera: Escritos histórico-políticos y constitucionales*. Por último, el historiador de la matemática Carl Immanuel Gerhardt publicó siete volúmenes bajo la rúbrica *Escritos matemáticos* (1849-1863), así como otros tantos que tituló *Escritos filosóficos* (1875-1890). No obstante sus carencias, estas obras resultan indispensables aún hoy, a falta de una edición completa de todos los textos.

Desde la época de Gerhardt se han publicado cientos de piezas, a menudo agrupadas bajo un lema común. Estas han afinado de manera considerable nuestra idea de la obra de Leibniz y, al mismo tiempo, nos han mostrado cuán poco la conocemos y cuántas riquezas nos quedan por extraer. Valga mencionar los *Opúsculos y fragmentos inéditos de Leibniz* de Louis Couturat, sobre lógica (1903); la edición de Ernest Gerland de sus *Escritos póstumos de Leibniz de contenido físico, mecánico y técnico* (1906); así como los volúmenes *Estudios matemáticos de G. W. Leibniz sobre combinatoria* (1976) y *El comienzo de la teoría de determinantes: Estudios póstumos de Leibniz sobre el cálculo de determinantes* (1980), recopilados por quien escribe.

La calculadora

Leibniz consideraba indecoroso que los hombres ilustres de su época se viesen obligados a dilapidar su tiempo en simples tareas de cálculo. Incluso él cometía errores cuando debía hacer números. A fin de resolver tales inconvenientes, proyectó un remedio ya en 1671. Se propuso construir una calculadora capaz de sumar, restar, multiplicar y dividir. Su propuesta superó a los ingenios previos concebidos por Wilhelm Schickard y Blaise Pascal, cuyas máquinas solo sumaban y restaban.

Leibniz presentó su primer modelo —no del todo operativo— en 1673 en la Real Sociedad de Londres. Durante toda su vida se esforzó para subsanar las deficiencias mecánicas. En 1693 comenzó a construir los que serían sus últimos modelos. El principal problema consistía en pasar a la siguiente cifra del sistema decimal (por ejemplo, añadir una decena cuando la suma de las unidades resulta mayor que diez). Para ello, inventó una nueva pieza con dos funciones: un par de engranajes en los que el número de dientes activos podía variar entre cero y nueve (denominada «rueda vástago»), y el rodillo escalonado.

La publicación de los manuscritos correspondientes permitirá reconstruir con precisión la historia de dicho invento. Leibniz puede ser considerado como uno de los padres de la computación, por cuanto introdujo, además, el sistema de numeración binario con el que trabajan los ordenadores actuales. Inventó también el primer conversor numérico, el cual permitía transformar las expresiones de un sistema a otro.



En 1671 Leibniz presentó en París su primera máquina calculadora. Esta reproducción corresponde a su segundo modelo.

LA EDICIÓN ACADÉMICA

En cuanto al proyecto de editar las obras completas del pensador, su piedra fundacional la hallamos en una resolución que la Asociación Internacional de Academias adoptó en 1901. Según esta, la realización de tan ambiciosa tarea quedaría a cargo de la Academia de las Ciencias francesa, la Academia de las Ciencias Morales y Políticas del mismo país y la Academia Prusiana de las Ciencias. De hecho, esta última se hallaba en deuda con Leibniz, pues fue a propuesta del genio y conforme a sus recomendaciones que, en 1700, Federico III se decidió a fundar la institución. La academia nació con el nombre de Sociedad Electoral de las Ciencias de Brandeburgo.

En 1901, el historiador Paul Ritter efectuó el trabajo preliminar indispensable para proceder con la edición. En colaboración con las academias francesas, preparó en Berlín un *Catálogo crítico de los manuscritos de Leibniz*. De este, sin embargo, solo se reprodujeron dos volúmenes parciales: el primero en 1908 (manuscrito) y el segundo en 1924 (impreso). En el curso de los trabajos de edición y hasta nuestros días, sus indicaciones han sido objeto de todo tipo de adiciones y mejoras. Dicho catálogo se encuentra hoy disponible en ritter.bbaw.de. Ritter se convirtió también en el primer director del proyecto, cargo que ocupó hasta 1939.

La cooperación germano-francesa se interrumpió como consecuencia de la Primera Guerra Mundial, por lo que, en 1920, la Academia Prusiana de las Ciencias decidió proseguir en solitario con el proyecto. El balance era desconsolador: tras 19 años de trabajo, ni un solo volumen había visto la luz. Fue por aquella época cuando la edición se dividió en siete series, tres de correspondencia y cuatro de escritos, de acuerdo con el siguiente esquema:

I. Correspondencia general, histórica y política.
II. Correspondencia filosófica.
III. Correspondencia matemática, científica y técnica.
IV. Escritos políticos.
V. Escritos históricos y filológicos.
VI. Escritos filosóficos.
VII. Escritos matemáticos, sobre ciencias naturales y técnicos.

Esta estructura de la edición global de la obra de Leibniz ha permanecido sustancialmente inalterada hasta nuestros días, con la salvedad de que, en 1976 y por motivos técnicos, la séptima serie fue dividida en otras dos:

VII. Escritos matemáticos (con 30 volúmenes previstos).
VIII. Escritos sobre ciencias naturales, médicos y técnicos (8 o 9 volúmenes).

Pero los trabajos de edición progresaban con demasiada lentitud. Ritter era el único erudito de la academia que podía dedi-

carse con exclusividad a la tarea. Los demás (filósofos como Willy Kabitz, Erich Hochstetter, Liselotte Richter, Helfried Hartmann y Dietrich Mahnke; germanistas como Waldemar von Olshausen y Kurt Müller; archiveros como Kurt Dülfer; historiadoras de la ciencia como Anneliese Maier, y matemáticos como Conrad Müller) colaboraban como voluntarios, a menudo desde fuera de Berlín y provistos tan solo de un contrato de servicios.

En 1923 apareció por fin el primer volumen (I,1). Sin embargo, desde entonces y hasta el comienzo de la Segunda Guerra Mundial solo fueron presentados otros seis (I,1; I,2; I,3; II,1; IV,1 y VI,1). En particular, aún no había aparecido ningún volumen de la serie sobre matemática, ciencia y técnica: una situación que se prolongaría durante mucho tiempo.

Más tarde no solo la Segunda Guerra Mundial ejerció consecuencias devastadoras, sino que también el destino parecía conspirar contra el proyecto. El filósofo y coeditor Dietrich Mahnke, responsable de la serie III de correspondencia, falleció en un accidente de tráfico en 1939, dejando tras de sí un manuscrito que apenas contenía un 40 por ciento del primer volumen (III,1). Su trabajo fue retomado más tarde por el historiador de la matemática Joseph Ehrenfried Hofmann. No obstante, este sufrió una desgracia similar en 1973, cuando ya casi lo tenía concluido. El volumen apareció finalmente en 1976, tres años después de su muerte.

LEIBNIZ EN LA ÉPOCA NAZI

Entre 1938 y 1939, la Academia Prusiana de las Ciencias fue reorganizada según las directrices de Adolf Hitler. En contra de la voluntad de la mayoría, el ministro de Ciencia, Bernhard Rust, nombró presidente al matemático Theodor Vahlen, jefe regional del partido en Pomerania. Junto con Vahlen, también formaba parte de la presidencia cuatripartita el intransigente ma-

Cálculo diferencial e integral

El filósofo y matemático René Descartes había escrito en su *Geometría* de 1637 que la relación entre las líneas rectas y las curvas no podría nunca ser conocida por el ser humano. En 1675, con la invención del cálculo diferencial e integral, Leibniz refutó la afirmación cartesiana. Su proyecto consistía en rectificar las curvas; es decir, en concebirlas como polígonos de infinitos lados infinitamente pequeños.

Para llevar a buen puerto este principio, Leibniz hubo de definir con precisión el concepto de infinitésimo. En contra de todas las afirmaciones imperantes de la época, Leibniz logró su propósito. En un primer momento consideró definir una cantidad infinitamente pequeña como aquella «menor que cualquier magnitud arbitrariamente especificable». Ignorante de la propuesta de Leibniz, ochenta años más tarde Leonhard Euler formuló la misma propuesta. Sin embargo, como ambos matemáticos acabarían por reconocer, una cantidad tal solo puede ser nula.

Así, en 1673 Leibniz definió los números infinitesimales como aquellos «menores que una cantidad arbitraria dada». Esta caracterización no otorga al concepto de infinitésimo ningún valor determinado, sino que se basa de manera implícita en una estimación: dado un número real positivo arbitrario, entonces la magnitud infinitesimal (variable) puede tomar un valor menor que dicho número real. La sutil diferencia semántica entre *especificable* y *dado* resulta aquí decisiva.

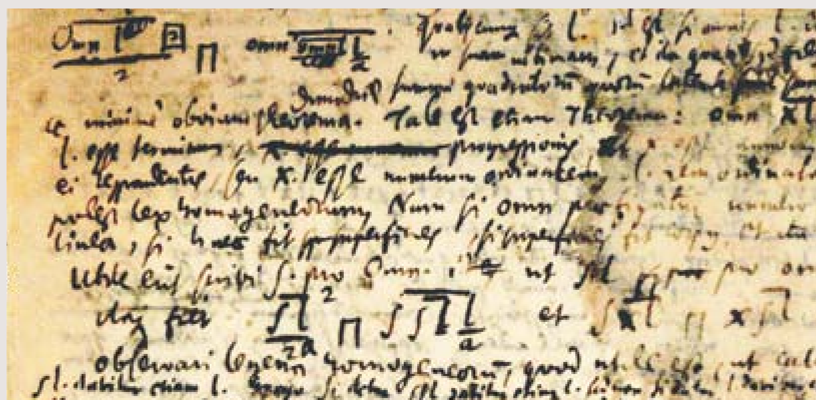
La matemática moderna ha traducido esa conceptuación leibniziana en un método de evaluación explícito. En la pulcra y rigurosa presentación de los tratados de análisis contemporáneos, la cual se remite al berlinés Karl Weierstrass (1815-1897), las magnitudes infinitesimales de Leibniz sobreviven en las expresiones diferenciales, como *dx* y *dt*. La única diferencia reside en que estos deben interpretarse con arreglo a la formulación moderna de la matemática.

Entre 1675 y 1676, las investigaciones de Leibniz versaron asimismo sobre los fundamentos de la geometría infinitesimal. Aunque concebida muy poco después de la invención del cálculo infinitesimal y sus correspondientes símbolos, los trabajos de Leibniz no fueron publicados hasta 1993. Su alcance queda patente en el hecho de que, a través de ellos, Leibniz quiso convertirse en miembro de la Academia de las Ciencias francesa. Incluso sin disponer del moderno concepto de límite, el sabio demostró con métodos de estimación arquimedianos que la superficie encerrada por una curva podía calcularse con exactitud si a tal efecto esta se aproximaba de la manera adecuada mediante un polígono. Con ello, anticipaba el concepto de integral introducido por Bernhard Riemann del siglo XIX.

En el mismo escrito, Leibniz demostraba por primera vez el criterio de convergencia para series alternadas que hoy lleva su nombre. En 1673 había encontrado la «serie alternada circular» o, como él la denominó, «cuadratura aritmética del círculo», debido a que en ella solo aparecían números racionales:

$$\pi/4 = 1 - 1/3 + 1/5 - 1/7 + 1/9 - \cdots$$

Los volúmenes 3, 4 y 5 de la serie VII de sus obras, ya publicados, dejan constancia de su cálculo original de 1675, el cual cuenta hoy con múltiples aplicaciones científicas y técnicas. Si esas obras hubiesen aparecido cuando el matemático aún vivía, la agria disputa con Isaac Newton sobre la autoría del cálculo infinitesimal jamás se habría producido.



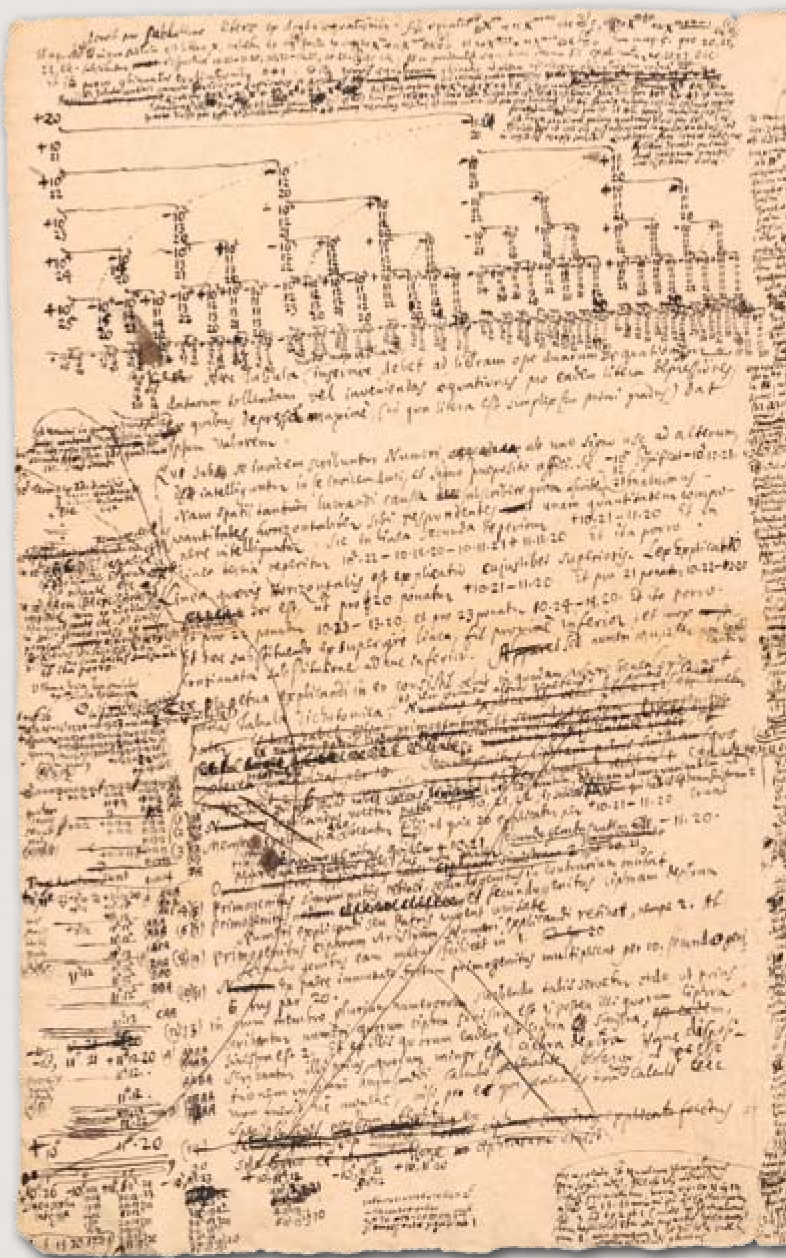
En 1675, Leibniz utilizó por primera vez el signo que hoy empleamos para denotar las integrales (*abajo*). Este deriva de la inicial de la palabra *suma*.

Combinatoria y determinantes

A diferencia del concepto actual, mucho más restrictivo, Leibniz entendía por *combinatoria* la puesta a punto de reglas para producir, de manera metódica y mediante la creación de símbolos adecuados, nuevo saber. Sin duda, hallamos ejemplos sobresalientes de esta idea en la introducción de símbolos como *dx*, *dy* o el que denota la integral, concebidos por él para abordar el cálculo diferencial.

Su interés por la notación matemática le puso sobre la pista de importantes hallazgos en otros ámbitos. Gracias a un método de su invención para escribir índices algebraicos, concibió la teoría de determinantes (desde su punto de vista, un ejemplo destacado de combinatoria). A principios del siglo XX, dicho método aún era empleado por los matemáticos.

En 1684 Leibniz halló la manera de calcular determinantes en el sentido de la combinatoria actual, lo que le permitió resolver sistemas de ecuaciones lineales con el método que hoy denominamos «regla de Cramer», publicada en 1750 por el suizo Gabriel Cramer. Leibniz también anticipó el «método de Laplace» para calcular determinantes, así como el procedimiento para eliminar incógnitas comunes en un sistema de dos ecuaciones de grado superior. Leonhard Euler, Etienne Bézout y James Sylvester llegaron a los mismos resultados en los siglos XVIII y XIX.



Leibniz introdujo el «método de Laplace» para calcular determinantes, así como un procedimiento para resolver ecuaciones algebraicas de grado superior. En el manuscrito de la imagen desarrollaba la solución a este problema.

temático nacionalsocialista Ludwig Bieberbach. Siendo ambos los más notorios representantes de la «matemática alemana», Vahlen y Bieberbach acordaron reorientar la edición de la obra de Leibniz y priorizar la serie científica y matemática. En 1939, el ministro nombró director de los trabajos de edición a Joseph Ehrenfried Hofmann. El prestigioso historiador de la ciencia era, sin embargo, miembro del partido, por lo que fue expulsado al finalizar la guerra.

Hofmann deseaba a toda costa más colaboradores, pues confiaba en que «con una dirección más experta, más fuerte, pero nunca más pretenciosa» la edición podría concluirse en 1956. La idea resultó utópica. Al poco, varios colaboradores abandonaron el equipo editorial. Hofmann viajó entre 1940 y 1941 al París ocupado y a Bruselas para buscar más documentación, pero las copias con las que regresó apenas sumaban unas 700 hojas. Ya entonces vertió duras críticas contra el trabajo realizado. Opinaba —con toda la razón— que había que eliminar las graves deficiencias del plan general vigente. Todo el trabajo de edición debía replantearse desde el principio.

La época de la guerra no rindió más frutos. La edición quedó paralizada en 1941, si bien se buscaron y catalogaron otros manuscritos. Pero desde 1938 y hasta el final de la contienda, en 1945, no apareció ningún volumen más. Después, la reanudación de los trabajos se mostró harto difícil. A partir de 1946, el filólogo Kurt Müller se reincorporó a la labor y asumió la dirección del centro de Berlín. Sin embargo, varios planes para

reclutar a otros colaboradores se vieron abocados al fracaso. Tampoco tuvieron éxito los esfuerzos para emplear de nuevo a Hofmann como editor. En 1956, en la Universidad de Münster se creó un centro de investigación sobre Leibniz. La edición de su obra, hasta entonces centralizada en Berlín, comenzó a repartirse entre varios centros de trabajo.

La situación política que se vivía en los cuatro sectores de Berlín ocasionó otros problemas. Kurt Müller vivía en Berlín occidental, pero el edificio de la academia en el que se encontraba la sede de los trabajos de edición se ubicaba en el sector soviético. El calificativo *prusiano* fue proscrito, por lo que la academia fue rebautizada con el nombre de Academia Alemana de Ciencias. Hasta la construcción del muro, en 1961, aparecieron bajo la dirección de Müller tres volúmenes de la serie I, con la correspondencia política e histórica. A diferencia de los textos publicados antes de la guerra, ahora comenzó a incluirse en ellos una reseña sobre la gestación de cada uno. Aunque esta práctica no implicaba grandes consecuencias para las cartas, desempeñó un papel esencial en el caso de los escritos, pues en ellos Leibniz había llegado al texto definitivo solo después de laboriosas tachaduras, añadidos y reemplazos. A fin de dar cuenta del proceso, los redactores se inspiraron en el excelente trabajo de la editorial Hölderlin, de Stuttgart. Su técnica con el aparato crítico permitía reproducir de una manera sistemática y visible el curso de los pensamientos que Leibniz había dejado por escrito.

La construcción del muro y la división de Berlín obligaron a reorganizar el trabajo editorial. En 1962 se estableció en Hanóver, en la Biblioteca de Baja Sajonia (hoy Biblioteca Gottfried Wilhelm Leibniz), un nuevo centro de trabajo, el Archivo Leibniz. En lo sucesivo, las series se repartieron entre las tres sedes del proyecto. En Berlín (en la otra vez reconvertida Academia de las Ciencias de la República Democrática Alemana) permaneció la serie IV de escritos políticos. Hasta el final de la RDA aparecieron allí otros dos volúmenes. El centro de trabajo de Münster asumió, además de las dos series filosóficas, las dos sobre ciencia y matemáticas (III y IV), sin que ello tuviera al principio consecuencias tangibles. Por último, el Archivo Leibniz de Hanóver atendió la correspondencia restante. La edición de los escritos históricos y filológicos (serie V) nunca ha sido emprendida hasta hoy.

En 1976, tres años después de la muerte de Hofmann, no solo apareció el primer volumen de la serie sobre matemática, ciencia y técnica. Sucedió algo más: en representación del estado de Baja Sajonia, el director del centro de Münster, Heinrich Schepers (hoy en día, el más veterano de los editores), me encargó la elaboración de los primeros cuatro volúmenes de la serie VII de escritos matemáticos. Por aquella época trabajaba como matemático e historiador de la ciencia en la Universidad Técnica de Berlín. Puede que mi elección se debiese al tema de mi tesis doctoral (la combinatoria en Leibniz) y al hecho de haber publicado varios volúmenes con algunos de sus trabajos póstumos.

LEIBNIZ EN EL SIGLO XXI

En Hanóver, donde más tarde se elaboraron las series III y VII, me apoyó desde 1976 un nuevo colaborador, Walter S. Contro, experto en historia de la matemática. Ambos tuvimos que empezar desde cero con la planificación y transcripción de estas series. El criterio de ordenación cronológica, vigente hasta entonces, solo se pudo seguir aplicando en combinación con un método de agrupación temática. Por desgracia, alrededor del 80 por ciento de los manuscritos carecen de fecha. Además, durante la estancia de Leibniz en París (1672-1676), solo la producción matemá-

El mejor de los mundos posibles

Leibniz concebía el mundo como obra de Dios. Como tal, debería corresponder al mejor los mundos posibles, ya que de otro modo contradiría la perfección del Creador. Pero ¿cómo explicar entonces la presencia de mal? Este problema, capital de la filosofía de la religión, fue planteado en la Antigüedad por Epicuro. Leibniz lo resolvió echando mano de la ética y de la teoría de la libertad. Acuñó el concepto de ***teodicea***, en sí mismo coherente aunque malinterpretado por Voltaire, quien lo satirizó en su *Cándido*.

La ética racional de Leibniz presupone que el individuo puede decidir con libertad entre dos acciones. La libertad humana consiste así en una conducta racional. Para ello debe conocerse el bien, el cual se deseará necesariamente. Así, a medida que mejoren las capacidades cognitivas del ser humano, mayor grado de moralidad revestirá su conducta. Sobre este fundamento racional descansa el «optimismo leibniziano». En su *Teodicea*, el filósofo subrayó el hecho de que el mejor de todos los mundos posibles admite también lo malo (lo «no bueno») y, por ello, no tiene por qué ser estrictamente bueno en todos sus posibles aspectos. Los males no deben considerarse solo como meras deficiencias, sino también como una posibilidad de imperfección en el mundo de los espíritus o mónadas. En un sentido moral, la perfección del mundo implica, precisamente, dicha posibilidad.


ESSAIS DE THEODICÉE,
Oder Betrachtung
Der
Gütigkeit Gottes,
Der
Freyheit des Menschen
Und des
Ursprungs des Bösen,
Nebst der
Durch ihre selbst eigene Gerechtigkeit
Vertheidigten göttlichen Sache,
Welcher vorgefügt ein Discours
Von der
Ubereinstimmung des Glaubens
mit der Vernunfft,
Samt angehängeten
Anmerckungen über Monf. Hobbes,
Alles in Frantzösischer Sprache geschrieben
Von dem
Herrn Baron von Leibnitz;
Anitzo aber seiner besondern Fürtrefflichkeit
wegen in die Deutsche Sprache gebracht,
Dem noch beygefügt
Dieses Hochgelahrten Herrn Barons
Lebens-Beschreibung.
Amsterdam,
In Verlegung Cornel. Boudestein,
1720.

En su única obra extensa publicada en vida, Leibniz intentó entender «la bondad de Dios», omnipotente y benevolente para con todos, pero que, sin embargo, permite la existencia de mal en el mundo.

tica de medio año ascendía a un imponente volumen de 800 a 900 páginas. En contadas ocasiones pueden datarse los documentos (por ejemplo, a partir de las marcas de agua del papel), por lo que con frecuencia debemos conformarnos con amplios márgenes temporales. El primer volumen de la serie VII apareció en 1990, el año de la reunificación. Desde entonces, gracias la inclusión en nuestro equipo de otros colaboradores, la serie VII se ha engrosado con cinco volúmenes: una sexta parte de los apuntes matemáticos de Leibniz.

El 2001, bajo mi supervisión, la Academia de las Ciencias de Berlín-Brandeburgo fundó un nuevo centro de trabajo que asumió la elaboración de la serie VIII de escritos sobre ciencias naturales, medicina y técnica, dirigida por el físico y filósofo Hartmut Hecht. El primer volumen apareció en 2009. Este corresponde al tomo número 49 de una obra que, en la medida en que podemos estimarla, superará algún día los cien libros.

Internet permite en la actualidad explorar nuevos caminos en la edición. La página www.leibniz-edition.de, de la Sociedad Alemana Gottfried Wilhelm Leibniz, proporciona información actualizada sobre los últimos volúmenes aparecidos, los centros de trabajo de ambas academias, así como instrumentos de ayuda en la edición académica. Los textos en proceso de elaboración siempre se publican en la Red en forma de archivos PDF antes de la publicación impresa, lo que los pone al alcance de todos los interesados.

A fin de establecer una colaboración internacional futura con científicos franceses y rusos, en la serie VIII nos hemos visto obligados a explorar nuevos caminos. Todos los manuscritos pendientes de publicación han sido digitalizados y puestos en línea con tres grados diferentes de resolución. Los 45.000 archivos escaneados se encuentran disponibles en ritter.bbaw.de; en estos momentos, los usan sobre todos dos colaboradores voluntarios en París y Moscú. También ofrecen un buen apoyo al centro de trabajo en Berlín, ya que los valiosos manuscritos originales no pueden ser enviados desde Hanóver. A diferencia de las fotocopias, los documentos escaneados ofrecen todo tipo de posibilidades de tratamiento de imágenes, lo que facilita la tarea de descifrar los manuscritos. Además, este procedimiento ayuda a conservarlos. Solo en raras ocasiones surge la necesidad de examinar un original.

Por vez primera, del volumen de la serie VIII aparecido en 2009 existe, además de la versión impresa, una edición electrónica en Internet. Esta se beneficia de todas las posibilidades técnicas que ofrece este medio: las ilustraciones están animadas, las líneas se corresponden con el original, la aparición del texto se completa con variantes en colores diversos, las referencias de contenido pueden ser verificadas gracias a una conexión con la Biblioteca Herzog August en Wolfenbüttel y, tal vez lo principal, el diseño del texto puede controlarse al cotejarlo directamente con el escaneado. Esta edición electrónica se encuentra en leibnizviii.bbaw.de. La viabilidad de mantener esta doble versión en futuros volúmenes dependerá de las posibilidades financieras y de personal del centro.

Aún aguarda al editor más de la mitad del trabajo. Con todo, el historiador de la ciencia muniqués Menso Folkerts dictaminó en 2008 que la edición Leibniz se encontraba en el buen camino. Proyectos a largo plazo como este solo son posibles bajo el amparo de las academias científicas. Difícilmente serían viables mediante programas universitarios de investigación, concebidos a menudo a corto plazo.

© Spektrum der Wissenschaft

Monadología

¿Cómo armonizar los conceptos de cuerpo y alma? Esta pregunta, clave en la historia de la filosofía, ha encontrado las más diversas respuestas desde la Antigüedad hasta nuestros días. La monadología constituye la solución propuesta por Leibniz y, al mismo tiempo, su teoría más conocida.

Como teoría sustancial monista, la monadología se dirigía contra la teoría homóloga de Descartes y su concepción dualista de pensamiento y extensión. Leibniz caracteriza lo inmaterial de cada ser viviente como sustancia simple, mónada o centro de fuerza, a la que siempre está subordinado un cuerpo material. La exacta correspondencia entre la mónada y su cuerpo ha sido arreglada por Dios desde la creación del mundo mediante una armonía preestablecida. Esta solución muestra de nuevo la inseparable unión entre teología y filosofía en el pensamiento de Leibniz. Por tanto, según Leibniz existen dos mundos: el inteligible, de las sustancias, y el visible, de los cuerpos. La armonía entre ambos quedó ilustrada en su metáfora del relojero. Dos relojes pueden funcionar sincronizados si el maestro relojero (Dios, en este caso) los ha puesto en hora al principio. El mundo de las mónadas, que aspira a la perfección, está regulado por los fines; el mundo corpóreo, por la causalidad.

Leibniz en español

Desde hace más de veinte años existe en España la Sociedad Española Leibniz para Estudios del Barroco y la Ilustración, con sede en el Instituto de Filosofía del CSIC, en Madrid, y que agrupa a un gran número de estudiosos procedentes de España y Latinoamérica (www.leibnizsociedad.org). Dicha sociedad promueve congresos y reuniones científicas e impulsa iniciativas editoriales, como el *Leibniz companion*.

Su proyecto más ambicioso es Leibniz en Español (www.leibniz.es), cuyo centro de coordinación se encuentra en la Universidad de Granada. Esta iniciativa ha puesto en marcha una edición en castellano de veinte volúmenes (cinco aparecidos hasta la fecha) con lo más significativo de la obra y correspondencia de Leibniz —incluida una gran cantidad de textos latinos que jamás habían sido traducidos a ninguna lengua moderna— bajo el título *Obras filosóficas y científicas* de G. W. Leibniz (Comares, Granada, 2007 y ss.). También patrocina la colección de monografías especializadas *Nova Leibniz*.

—Juan Arana
Departamento de filosofía y lógica y filosofía de la ciencia
Universidad de Sevilla

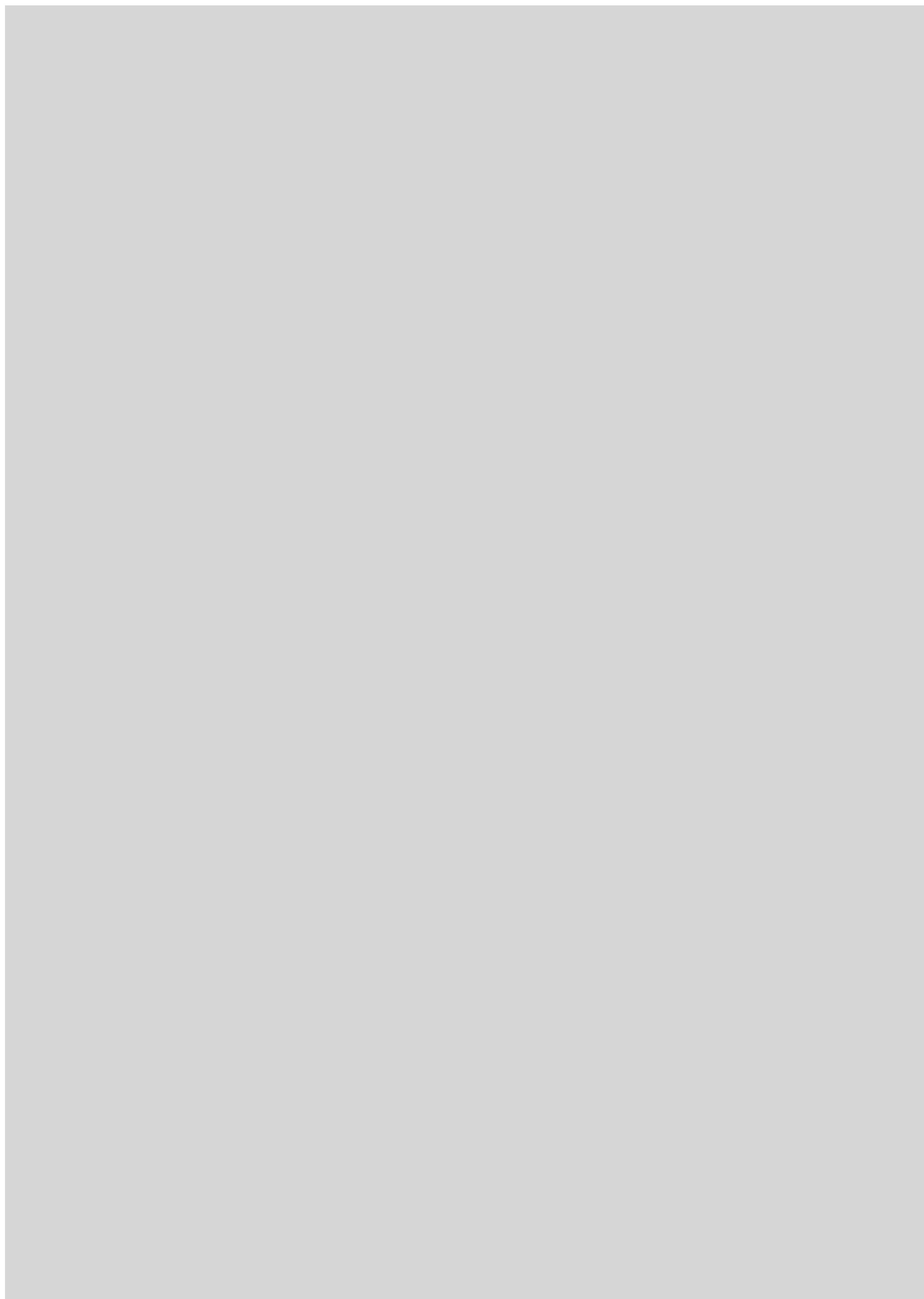
PARA SABER MÁS

Im freiesten Streifzug des Geistes (Liberrimo mentis discursu): Zu den Zielen und Methoden Leibnizscher Mathematik. E. Knobloch en *Wissenschaft und Weltgestaltung*, págs. 211-229. Dirigido por K. Nowak y H. Poser. Olms, Hildesheim, 1999.

Zur Geschichte und Situation der Akademie-Ausgabe von Gottfried Wilhelm Leibniz. H. Schepers en *Wissenschaft und Weltgestaltung*, págs. 291-298. Olms, Hildesheim, 1999.

Langzeitvorhaben in der Akademie: Die Geschichte der Leibniz-Edition zwischen Kaiserreich und geteiltem Deutschland. H. Poser en *Die Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin 1914-1945*, págs. 375-389. Dirigido por W. Fischer. Berlín, 2000.

Die Leibniz-Edition zwischen Wissenschaft und Politik. M. Folkerts en *Kosmos und Zahl*, págs. 23-45. Dirigido por H. Hecht et al. Stuttgart, 2008.



Meurig W. Williams es doctor en química por la Universidad de Oxford. Su interés por la triboelectricidad nació durante su época de investigador en Xerox, compañía para la que trabajó entre 1970 y 1983. Cuenta con once patentes en EE.UU. y numerosas publicaciones en prensa científica especializada.



QUÍMICA

¿A qué se debe la electricidad estática?

Considerado tradicionalmente como un problema perteneciente al ámbito de la física, la respuesta tal vez llegue de la mano de la química y otras disciplinas

Meurig W. Williams

Cuando dos objetos entran en contacto y después se separan, sus respectivas superficies adquieren una carga eléctrica. Esta recibe el nombre de carga triboeléctrica, también conocida como carga estática o de contacto. El estudio de la triboelectricidad se remonta a los experimentos del filósofo griego Tales de Mileto, quien la descubrió al frotar ámbar contra lana. No en vano, la etimología del término responde a las voces griegas para «frotar» (*tribein*) y «ámbar» (*elektron*), si bien el mismo efecto se produce también en contactos sin rozamiento.

Esa acumulación de potencial electrostático puede acabar produciendo una descarga eléctrica de consecuencias muy variadas: desde la ligera sacudida que experimentamos al tocar el pomo de una puerta tras haber caminado sobre una alfombra en un día seco, hasta el nefasto incendio que en 1937 devoró el dirigible *Hindenburg*, cuyo origen ha sido atribuido a una chispa electrostática. Las descargas triboeléctricas constituyen también una fuente de preocupación para la NASA, ya que la ausencia de humedad en ambientes como la Luna o Marte facilitan sobremanera la acumulación de cargas estáticas. Al tocar una compuerta después de un paseo por la superficie lunar, un astronauta podría provocar una descarga que averiase circuitos fundamentales. Con todo, la electricidad estática no siempre acarrea inconvenientes. El fundamento de dispositivos hoy tan comunes como las fotocopiadoras y las impresoras láser reside, precisamente, en un control adecuado de la triboelectricidad.

A pesar de tratarse de un fenómeno muy conocido, la electricidad estática continúa planteando grandes incógnitas. En la actualidad, varios proyectos de investigación en áreas que van desde la física y la química hasta la medicina o la meteorolo-

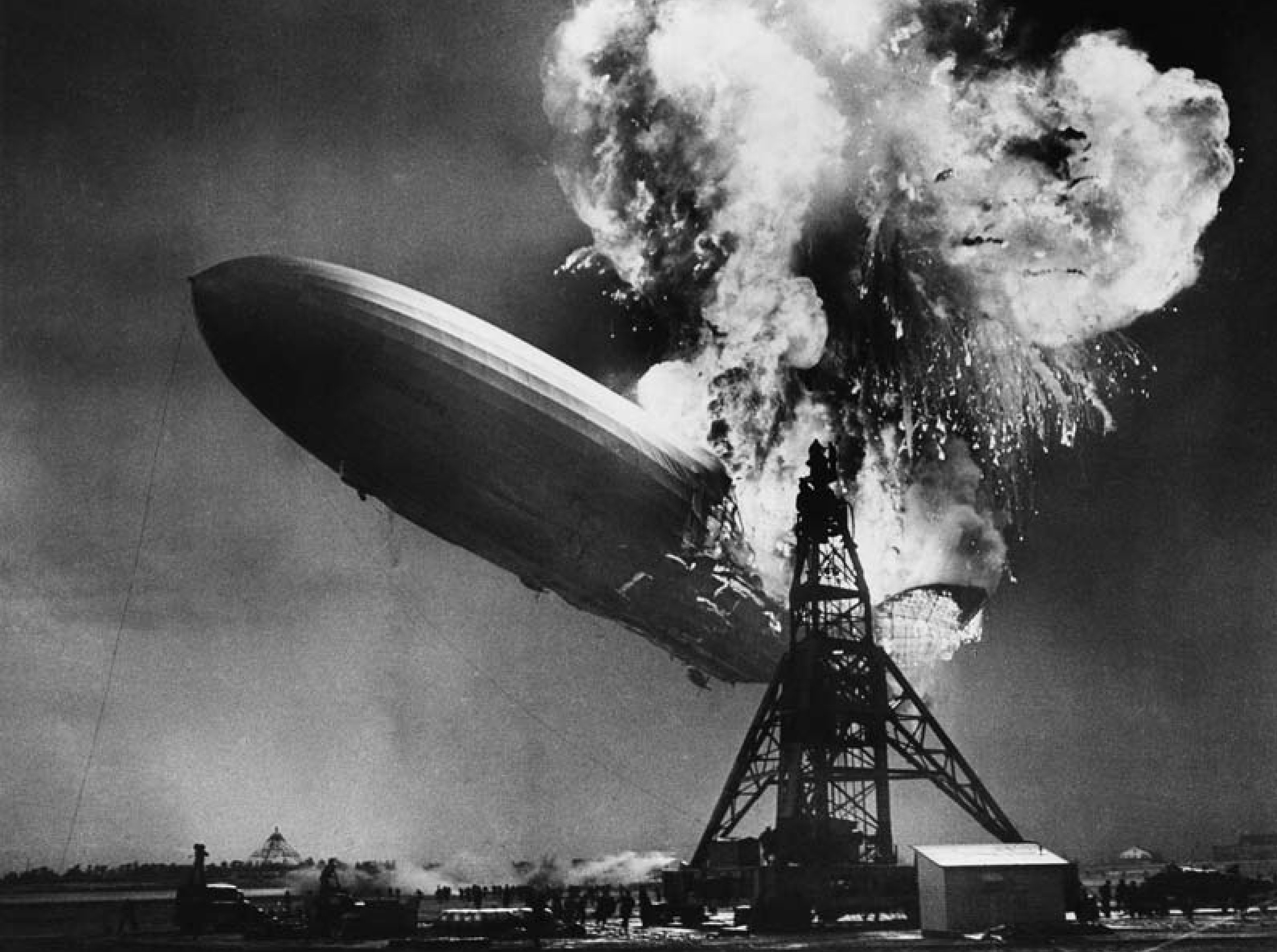
EN SÍNTESIS

A pesar de constituir uno de los primeros fenómenos que fueron objeto del estudio científico, la electricidad estática, o triboelectricidad, continúa planteando numerosos interrogantes físicos y químicos.

Entre otras aplicaciones, la triboelectricidad constituye la base de las fotocopiadoras y las impresoras láser. Sin embargo, pocas investigaciones han abordado el fenómeno desde una perspectiva fundamental.

En los últimos años, varios estudios han demostrado que existen múltiples mecanismos de intercambio de carga entre superficies: transferencia de electrones, de iones e incluso de pequeños fragmentos de material.

Se sabe que el peso relativo de cada mecanismo depende de la composición de los materiales y del tipo de contacto mecánico, pero no existe una teoría general que dé cuenta de todos los pormenores del proceso.



Una descarga estática pudo haber provocado el espectacular incendio del dirigible *Hindenburg*, acontecido en Nueva Jersey el 6 de mayo de 1937. Pero la electricidad estática no siempre es peligrosa. Gracias a ella funcionan las fotocopiadoras y las impresoras láser. A pesar de ello, los pormenores del proceso de carga triboeléctrica continúan siendo objeto de una candente investigación.

BETTMANN/CORBIS

gía abordan diversos aspectos de la triboelectricidad. No obstante, pocos científicos se han dedicado a estudiarla a un nivel fundamental.

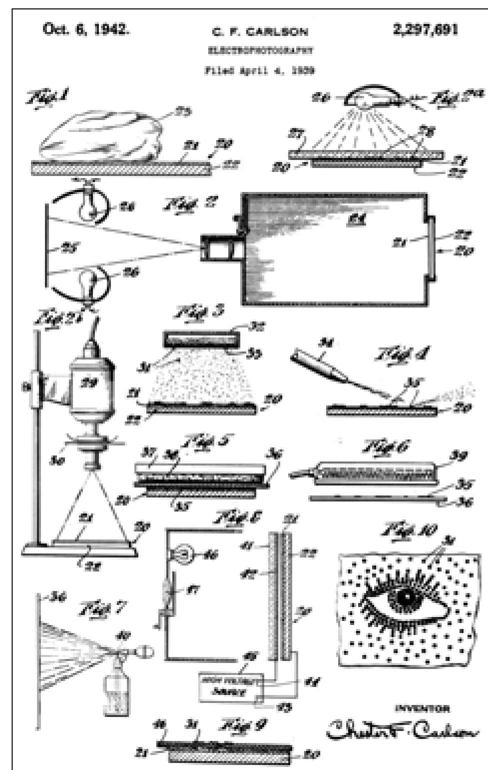
Hoy sabemos que el intercambio de carga entre dos metales se debe a una transferencia de electrones. Sin embargo, cuando al menos uno de los materiales es un aislante, no existe ningún mecanismo general que dé cuenta de la naturaleza de los portadores de carga. Algunas teorías atribuyen el fenómeno al intercambio de electrones; otras, a la transferencia de iones. Los primeros son partículas subatómicas dotadas de carga negativa, cuyo flujo en el seno de un metal conductor genera una corriente eléctrica. Un ion, en cambio, puede ser un átomo, una molécula o un fragmento de polímero. Si cuenta con más protones que electrones —lo que le confiere una carga total positiva—, recibe el nombre de catión. En caso contrario, se denomina anión.

Con arreglo a las condiciones experimentales, varios estudios han corroborado la transferencia de electrones y de iones. Pero los datos al respecto se muestran limitados y, a menudo, contradictorios. Algunas investigaciones recientes han demostrado que la acumulación de carga puede obedecer asimismo a una transferencia de cantidades diminutas de material. Sin embargo, solo hace poco ha comenzado a surgir una interpretación del proceso a nivel molecular. Los expertos tienen cada vez más claro que varios mecanismos pueden intervenir de manera simultánea; pero, en líneas generales, se desconoce cómo depende el fenómeno de la naturaleza de los materiales y de las condiciones experimentales.

No deja de resultar curioso que, cuando el intercambio de cargas tiene lugar entre aislantes, el origen mismo del fenómeno se comprenda aún menos que la manera en que este tiene lugar. La complejidad inherente al proceso se admite desde hace tiempo: ¿cómo puede un material que no conduce la electricidad adquirir carga eléctrica? Al respecto, debemos responder tres preguntas. ¿Son las especies responsables del intercambio de carga electrones o iones? ¿Qué fuerza motriz provoca su transferencia? ¿Cuándo se detiene el proceso? Aunque el problema se ha abordado casi siempre desde el punto de vista de la física, los mecanismos responsables del intercambio de carga no han comenzado a entenderse bien hasta la aplicación de varios conceptos químicos.

Una razón que explica el lento progreso en nuestra comprensión del fenómeno la hallamos en la falta de incentivos. La mayoría de las investigaciones sobre triboelectricidad persiguen resolver problemas de orden práctico, los cuales no suelen exi-





Chester Carlson invirtió largos años (y hubo de afrontar grandes dificultades y tribulaciones) en la invención del primer aparato xerográfico (*izquierda*). La patente que describía el proceso, denominado electrofotografía, le fue otorgada en 1942 (*derecha*).

CORTESÍA DE LA CORPORACIÓN XEROX

gir un análisis profundo de las causas. Una carga no es más que una carga, con independencia de lo que ocurra y por qué. Con todo, una descripción prolija de la triboelectricidad contribuiría, sin duda, a lograr tan útiles propósitos.

LA EXPERIENCIA DE XEROX

Con diferencia, los principales productos comerciales basados en la triboelectricidad son las fotocopiadoras y las impresoras láser. Estas emplean los mismos principios que aquellas, solo que incorporan una fuente de luz láser. Ambas fueron desarrolladas por la corporación Xerox.

Una copiadora electrofotográfica opera gracias a dos fenómenos: la carga triboeléctrica y la fotoconductividad. Un material fotoconductor es aquel cuya conductividad aumenta cuando se lo expone a la luz. Si esta procede de la imagen de un documento, en la zona iluminada se producirá una descarga. De esta manera, las partículas cargadas del pigmento seco (el tóner) se verán atraídas por el «grabado» que deja la imagen sobre el fotoconductor. Después, las partículas del tóner se transfieren al papel y se funden para producir la copia.

El tóner se carga triboeléctricamente cuando se mezcla con un portador, combinación que recibe el nombre de revelador. Los portadores suelen consistir en pequeñas bolitas, de unos 100 micrómetros de diámetro, revestidas parcialmente de polímero. Entre otros requisitos, la composición del tóner y la del portador se eligen para optimizar el proceso de carga triboeléctrica. Hubo un tiempo en que se pensó que una comprensión de los mecanismos responsables de la triboelectricidad redundaría en el diseño de mejores materiales para el revelador. El éxito inicial de las fotocopiadoras proporcionó este incentivo. Pero los avances se sucedieron de todos modos, por lo que no surgió la necesidad de profundizar en las causas del fenómeno.

Mi interés por el tema nació en los años setenta, cuando trabajaba como químico para Xerox. Mi objetivo consistía en investigar la relación entre la triboelectricidad y la composición de los materiales. Las primeras fotocopiadoras Xerox, fabricadas en 1960, producían copias de mala calidad. Su desarrollo llegó de la mano de los intentos exclusivamente empíricos realizados por el Instituto Battelle Memorial, cuyos expertos se proponían fabricar materiales reveladores, pero sin aplicar ningún conocimiento básico sobre la triboelectricidad. La dificultad para lograr una calidad de copia aceptable aumentaba de manera exponencial con la velocidad del proceso. De hecho, la invención del modelo 9200, de alta velocidad, no tuvo lugar de manera inmediata; una clara indicación de que la versión de Xerox de la electrofotografía (a la que se denominó xerografía) se acercaba a sus límites.

En esa época, Xerox accedió a una nueva técnica electrofotográfica que mejoraba de manera notable la calidad de las copias. Esta se basaba en el empleo de reveladores conductores y en un control de la carga eléctrica del tóner basado en el empleo de aditivos. Más tarde, esta idea sería aprovechada para demostrar el mecanismo de transferencia de iones en el intercambio de cargas. Dicho resultado se obtuvo gracias a una sucesión fortuita de acontecimientos que comenzó con un análisis de nuestros competidores, un episodio que ahora parece haber desaparecido de la historia de Xerox.

En 1973 se nos encargó a un equipo de seis investigadores (en el que los otros cinco miembros eran físicos) que analizásemos el gran número de patentes relacionadas con los procesos de copia que habían sido concedidas a Kodak. A cada uno se nos asignó el estudio de un subsistema distinto, a fin de evaluar si Kodak tenía intenciones serias de entrar en el mercado de fotocopiadoras. Tras revisar los materiales para reveladores, fui el único que llegó a la conclusión de que, en efecto, Kodak planeaba introducir una fotocopiadora en el mercado. Pero se impuso la opinión de la mayoría, con la consecuencia de que, cuando Kodak comercializó su primera Ektaprint, en 1975, Xerox fue atrapada por sorpresa en varios frentes.

Sobre mi mesa apareció una fotocopia realizada con una Ektaprint, junto con un requerimiento para que explicase a la

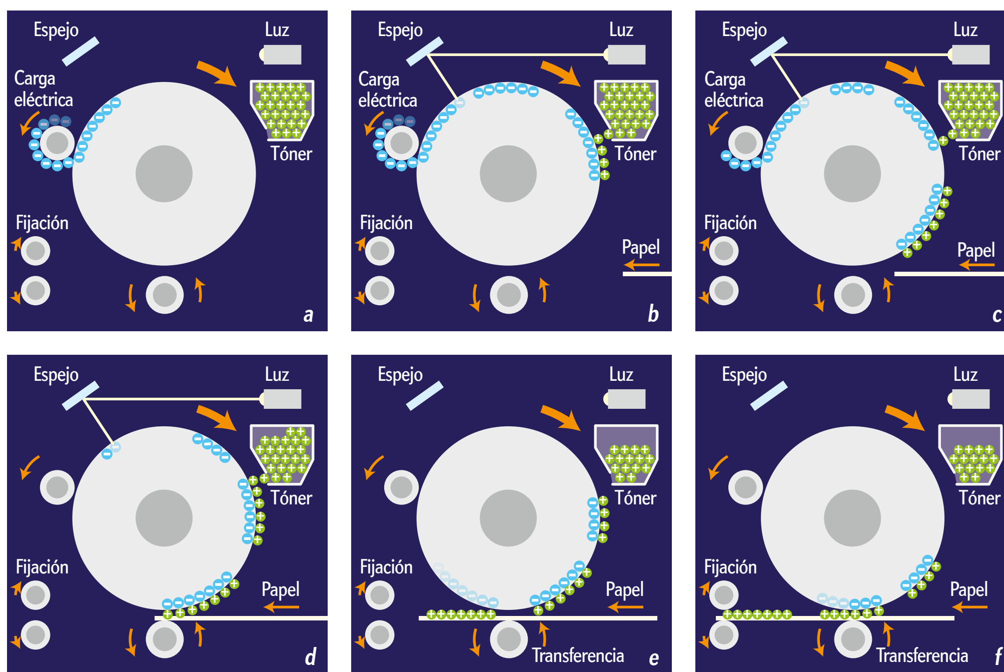
dirección de la compañía cómo era posible que Kodak produjese copias de una calidad tan superior a las mejores de Xerox (en el relleno de las zonas sólidas, en la agudeza en los bordes de las letras y en el bajo nivel de tinta dispersa por el resto de la hoja). Mis explicaciones al respecto fueron acogidas con gran incredulidad, ya que la técnica empleada por Kodak difería en numerosos aspectos de las directrices básicas adoptadas por Xerox. Al analizar el revelador de Kodak, quedó patente que la buena calidad de sus copias obedecía al empleo de un revelador conductor (con un tóner de carga positiva), frente a los reveladores aislantes (y tóneres de carga negativa) de Xerox.

El empleo de un tóner con carga eléctrica positiva respondía al hecho de que, de forma empírica, Kodak había descubierto ciertos agentes de control de carga que generaban y controlaban las cargas positivas gracias a la incorporación de sales cuaternarias de amonio (compuestas por un catión, consistente en un átomo central de nitrógeno unido a cuatro hidrocarburos, y un anión, como un ion cloruro). Sin duda, Kodak había demostrado la habilidad de sus químicos frente a los de Xerox. Diseñar el material de un revelador electrofotográfico requiere las mismas destrezas que entender el proceso de carga triboeléctrica en los polímeros. Y para ello hacían falta conocimientos de química: un punto fuerte en Kodak, pero no tanto en Xerox. Con todo, y a pesar de aquella ventaja inicial, la balanza se inclinaría más tarde del lado de Xerox debido a un cúmulo inusual de circunstancias.

La diferencia en la calidad de las copias alcanzaba tal magnitud que Xerox reconoció de inmediato que debía usar la misma técnica que sus competidores. Los físicos de la compañía comenzaron a estudiar con devoción la razón por la que los reveladores conductores mejoraban la calidad de las imágenes. Un equipo de químicos se encargó de producir y probar un gran número de tóneres con diferentes sales cuaternarias de amonio en reveladores conductores. Semejante actividad se tradujo en al menos una docena de patentes, en algunas de las cuales participé personalmente, basadas en el diseño de Kodak. Solicitadas entre 1978 y 1985, fueron concedidas a Xerox entre 1980 y 1987. Por increíble que parezca, Kodak nunca las impugnó. Las técnicas que la empresa ya había patentado le bastaban para ofrecer una calidad de copia superior a la de Xerox e IBM, lo cual le permitió dominar el mercado durante un tiempo.

No obstante, Kodak no supo capitalizar esa ventaja y no tardó en abandonar el mercado de fotocopiadoras. ¿Qué hizo que Kodak entregase su joya de la corona en técnicas de reprografía a un competidor tan bien establecido? (Una pregunta que, a la vista del deprimido estado actual de la compañía, no deja de suscitar cierto interés.) ¿Tuvo algo que ver la querella que la Comisión Federal de Comercio estadounidense (FTC) presentó contra Xerox en 1973 por supuestas prácticas de competencia desleal? Cuando eso ocurrió, Xerox prefirió no enzarzarse en pleitos y aceptó un acuerdo. Según este, debía ceder a sus competidores la licencia de todas las patentes relacionadas con fotocopiadoras, pero, a cambio, podría solicitar la licencia cruzada de las patentes de cualquier licenciatario. ¿Por qué aceptó la compañía un acuerdo de tales características en un caso que, según las declaraciones del entonces economista jefe del FTC Frederic M. Scherer, se encontraba relativamente equilibrado en términos legales? ¿Acaso fue para acceder a la patente de Kodak 3.893.935, en la que la empresa había registrado los materiales para reveladores que amenazaban el futuro de Xerox?

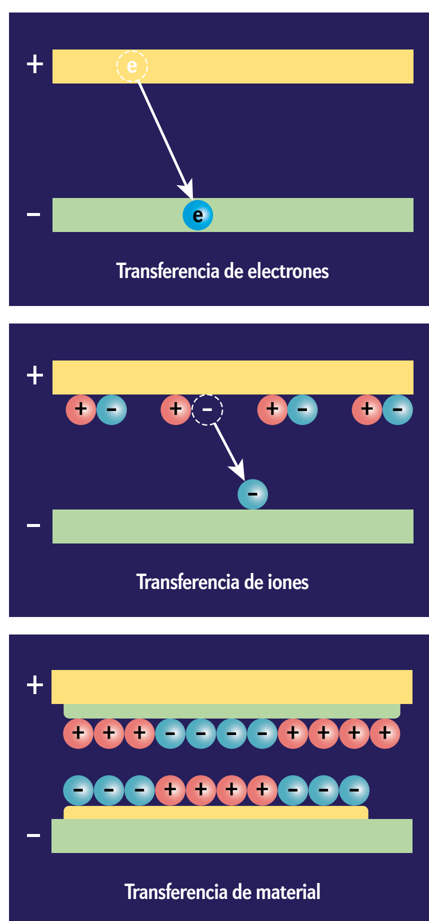
Hacia los años setenta, las técnicas electrofotográficas de Xerox habían tocado un techo que sus laboratorios no se hallaban en condiciones de superar. La compañía escapó de este problema comercial potencialmente desastroso gracias a la adopción del método de Kodak: materiales conductores para los reveladores y tóneres de carga positiva. Desempeñé una función clave en los análisis de las técnicas de Kodak y aún poseo la documentación original. Pero, sorprendentemente, tales acontecimientos no figuran en ninguno de los registros históricos sobre los métodos reprográficos de Xerox. De hecho, el autor de una de las historias de la compañía había estudiado en el pasado las propiedades de los reveladores conductores y había publicado sus resultados en 1987. El análisis de competidores constituye una práctica comercial común, por lo que cabe preguntarse a qué se debe tanta selectividad histórica.



El funcionamiento de una fotocopiadora se basa en la electricidad estática. Una correa o tambor fotoconductor posee carga negativa (*a*). Al ser iluminado, la luz descarga las zonas que no formarán parte de la imagen impresa (*b*). El tóner, con carga positiva, se ve atraído por las zonas cargadas del tambor (*c*); después, este será transferido al papel (*d* y *e*). Por último, el calor fija el tóner sobre el papel (*f*).

En 2003, durante uno de los congresos sobre propiedad intelectual organizados por la Fundación Lemelson en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, un físico de Xerox y destacado inventor hizo un interesante comentario sobre la estrategia de patentes de Kodak. En una sesión en la que se analizaba el papel de la propiedad intelectual en el proceso creativo e innovador, declaró: «Kodak estaba usando los secretos industriales más a menudo [que las patentes]. Prefería mantener sus inventos como secretos industriales, a fin de que no expirasen». Una observación curiosa si tenemos en cuenta el papel que las patentes de Kodak desempeñaron en los avances de Xerox; sobre todo, porque fue hecha en presencia del moderador del encuentro, un antiguo alto cargo de Xerox que, en los años setenta, había dirigido el grupo de físicos de la empresa.

Debido a la manera en que se sucedieron los acontecimientos entre Kodak y Xerox, esta última halló una solución a sus problemas técnicos. Como consecuencia, la motivación para realizar investigación básica en triboelectricidad se desvaneció.



La generación de carga triboeléctrica puede ocurrir por medio de tres mecanismos. En ocasiones, más de uno puede tener lugar de manera simultánea. En la transferencia de electrones (*arriba*), uno de los electrones de un metal pasa por efecto túnel hacia el volumen de un polímero. En metales y polímeros se ha documentado, asimismo, la transferencia de iones (*centro*). Investigaciones recientes han indicado la existencia de un mecanismo adicional que daría cuenta de la transferencia de carga entre dos polímeros: el intercambio de pequeños fragmentos de material (*abajo*). Como resultado, en cada superficie se genera un mosaico de cargas positivas y negativas, si bien cada una de ellas acaba el proceso con una carga neta distinta de cero.

MECANISMOS DE CARGA

Dado que la carga por contacto entre dos metales podía explicarse en términos de una transferencia de electrones, la triboelectricidad había sido clasificada como un problema de física del estado sólido. En tales casos, la fuerza que rige el proceso se debe a la diferencia en el trabajo de extracción característico de cada metal; es decir, la energía mínima necesaria para arrancar un electrón de su superficie. En los contactos metal-polímero se habían observado relaciones lineales entre el trabajo de extracción del primero y la carga generada en el segundo, lo cual se interpretó como una prueba de que se trataba de un mecanismo de transferencia de electrones. Más tarde se constató que dicha relación no se cumplía siempre, pero la discrepancia se atribuyó a la dificultad de obtener resultados reproducibles, habida cuenta de la gran cantidad de variables implicadas, así como de la posibilidad de que más de un mecanismo estuviese operando de manera simultánea.

Para explicar el proceso de carga entre dos aislantes, los físicos desarrollaron varias teorías que suponían la existencia de algún mecanismo de transferencia de electrones. Pero, aparte de no contribuir a la cuestión sobre la naturaleza de las especies responsables del intercambio de carga, tales teorías han tenido un éxito discutible a la hora de abordar la fuerza motriz en términos de «trabajos de extracción efectivos» de los aislantes. La validez de semejante concepto resulta cuestionable, ya que un aislante carece de electrones libres. Con todo, en ciertos casos dichas teorías han logrado explicar el límite del proceso de intercambio de cargas a partir del campo eléctrico generado por las cargas mismas. En otras situaciones, la acumulación de carga se detiene cuando el campo eléctrico ambiente supera la rigidez dieléctrica del aire circundante. Cuando eso ocurre, el campo arranca electrones de las moléculas del aire, lo cual lo convierte en un medio conductor que extrae corriente del material.

Aunque un enfoque basado exclusivamente en la física resultaba a todas luces insuficiente para abordar un problema tan multidisciplinar, la cultura física que imperaba en Xerox no supo ver esa limitación. Al final, un químico de la compañía revisó los modelos sobre la estructura electrónica de polímeros orgánicos, con énfasis en aquellos que poseían grupos altamente ordenados, con disposiciones rígidas y periódicas de átomos, algunos de los cuales exhibían propiedades casi metálicas. Su conclusión fue que la descripción de la estructura electrónica de tales sustancias exigía introducir conceptos «más usuales en electroquímica y fisicoquímica que en física del estado sólido».

Dos décadas después de que Kodak descubriese los agentes de control de carga para sus tóneres, varios investigadores emplearon la misma idea (un ejemplo del concepto químico de iones móviles) para demostrar la existencia de un mecanismo de transferencia de iones. Entre otros, a este avance contribuyeron Arthur Diaz, del Centro de Investigación Almaden IBM de San José; Howard Mizes y Kock-Yee Law, de Xerox; y Logan McCarty y George Whitesides, de Harvard. Un ion móvil puede desplazarse de una superficie a otra porque su contraión (el ion de carga opuesta que lo acompaña en el material) o bien es notablemente mayor y cuenta con menos movilidad, o bien se encuentra unido a un polímero y carece de libertad para transferirse. En el caso de moléculas y polímeros con un ion móvil, se ha demostrado que el mecanismo de intercambio de carga se halla relacionado con la transferencia de dicho ion, lo que se refleja tanto en el signo de la carga como en su magnitud. Sin embargo, la fuerza que desencadena el proceso sigue resultando esquiva. Además, el intercambio de carga se había observado también en polímeros carentes de iones móviles, lo que apuntaba a la existencia de algún mecanismo adicional.

En 2008, McCarty y Whitesides hallaron una respuesta parcial al problema. Propusieron que, cuando entre ambos polímeros se forma una delgada película de agua, algunas de sus moléculas

SIGMA XI

se disociarían y los iones hidróxido resultantes mostrarían una adsorción preferencial en una de las superficies. Su hipótesis concordaba con el resultado de algunos experimentos electrocinéticos. Sin embargo, en 2011 el grupo de Bartosz Grzybowski, de la Universidad Noroccidental de EE.UU., demostró que el intercambio de carga podía tener lugar entre polímeros no iónicos y en ausencia total de agua. Ello revelaba la presencia de un nuevo mecanismo que diferiría por completo tanto de la hipótesis del ion hidróxido como, en general, de las propuestas de transferencia iónica. A pesar de ello, este resultado no invalida la hipótesis de McCarty y Whitesides en aquellos casos en los que el fenómeno ocurre en presencia de agua; un caso en el que quizá concurran varios mecanismos a la vez.

TRANSFERENCIA DE MATERIAL

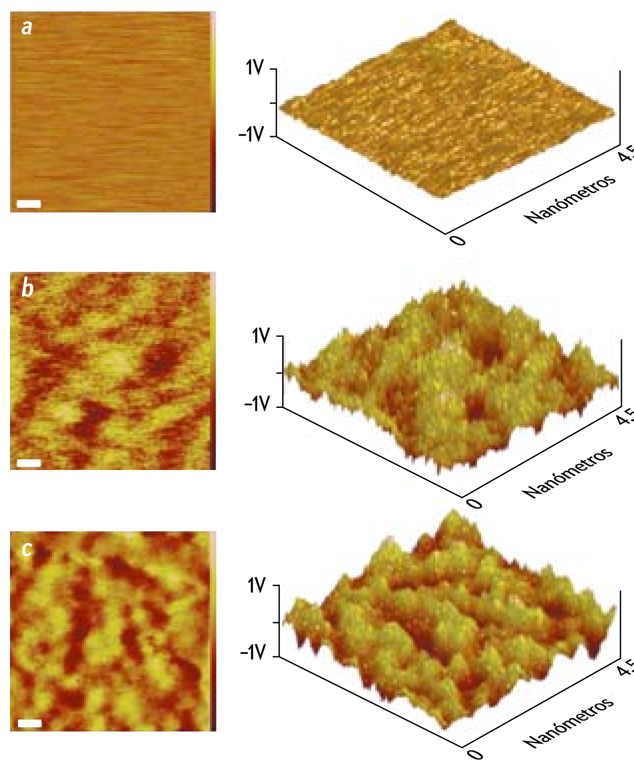
En los últimos años se han referido grandes avances en lo que respecta a los mecanismos de transferencia de carga entre polímeros, un campo que está experimentando enormes progresos gracias al análisis de superficies (eléctrico, químico y electroquímico). En todos los casos, el proceso obedece a la aplicación de una fuerza mecánica de magnitud considerable, ya se trate de presión, frotamiento o cizalladura.

Se sabe desde hace tiempo que el contacto entre un polímero y otro material puede provocar la transferencia de pequeños fragmentos del primero hacia la superficie del segundo. En 2011, a partir de estudios basados en microscopía de fuerza Kelvin (un análisis de alta resolución de las propiedades eléctricas de una superficie), Grzybowski y su equipo demostraron que, al presionar mutuamente dos polímeros y luego separarlos, esa transferencia de material podía verse acompañada de un intercambio de cargas. Los investigadores hallaron que, si bien cada superficie acababa dotada de una carga eléctrica neta, a escala nanoscópica cada una de ellas desplegaba un mosaico aleatorio de regiones positivas y negativas. Este fenómeno causó una gran sorpresa, ya que durante siglos se había supuesto que, en la carga por contacto, cada superficie adquiría una carga uniforme. El resultado implicaba, además, que el número de cargas intercambiadas era mucho mayor de lo que se pensaba: el fenómeno no afectaría a uno de cada 10.000 grupos superficiales, sino más bien a uno de cada 100.

Diversos experimentos de espectroscopía y análisis químico de superficies revelaron la presencia de especies oxidadas, las cuales serían responsables del proceso de carga. El hallazgo de este mecanismo de transferencia de material supuso un avance notable. No solo proporcionaba una alternativa a la transferencia de electrones o iones, sino que, por vez primera, daba cuenta de los pormenores del proceso. Al presionar dos polímeros uno contra otro y separarlos, las superficies intercambian pequeños grumos de material. Para que ello suceda, deben romperse enlaces covalentes, lo cual provoca la formación de fragmentos de polímero con radicales libres (átomos o moléculas con electrones desapareados y, por tanto, muy reactivos). Al reaccionar con el oxígeno o el agua del ambiente, dichos radicales libres darían lugar a las especies portadoras de carga.

En 2012, Fernando Galembeck y sus colaboradores, de la Universidad de Campinas, en Brasil, llevaron el mecanismo de transferencia de material un paso más lejos. Tras cizallar conjuntamente teflón y polietileno (es decir, tras presionarlos y retorcerlos uno contra otro) observaron la existencia de regiones macroscópicas cargadas análogas a las referidas por el grupo de Grzybowski. Una vez extraídos de la superficie con ayuda de disolventes, los materiales implicados fueron identificados como iones de polímeros. Los residuos de teflón poseían carga predominantemente negativa; los de polietileno, positiva. Para explicarlo, los investigadores propusieron que el aumento de temperatura en los puntos de contacto provocaría la plastificación del material, su fusión, o ambas. Después, las fuerzas de cizalla romperían las cadenas moleculares del polímero, lo que resultaría en la formación de fragmentos con radicales libres. La transferencia de electrones desde los radicales de polietileno hacia los de teflón, más electronegativos, los convertiría en cierta clase de iones (de carga positiva y negativa, respectivamente) conocidos con el nombre de anfífilos. Por último, los dominios macroscópicos se formarían debido a una combinación de dos factores: por un lado, en una interfaz y en un ambiente polar, se sabe que los anfífilos tienden a disponerse de manera ordenada; por otro, el teflón y el polietileno resultan inmiscibles.

Una comparación de los trabajos de Galembeck y Grzybowski ilustra la compleja interacción entre las propiedades de los polímeros y la naturaleza del contacto. La contribución de cada uno de los factores identificados por Galembeck en el mecanismo de transferencia de material depende de las propiedades viscoelásticas, topográficas y químicas de cada polímero. Por ejemplo, los enlaces químicos no se escinden con la misma facilidad en el polidimetilsiloxano empleado por Grzybowski (un polímero cuya cadena principal se compone de átomos de silicio y oxígeno) que en los polímeros usados por Galembeck, con cadena principal de carbono. Por otro lado, en contactos ligeros y con poco rozamiento se alcanzan temperaturas más bajas que en la cizalladura, por lo que cabe esperar un menor grado de fusión



La microscopía de fuerza Kelvin muestra la transferencia de fragmentos nanoscópicos de polímero entre dos superficies. Antes del contacto (*a*), el material se muestra suave. Tras interaccionar con un polímero de su misma composición (*b*) o con uno diferente (*c*), aparecen patrones que reflejan la transferencia de material.

DE: H. T. BAYTEKIN ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 333, PÁG. 308-312; REPRODUCIDO CON PERMISO DE LA AAAC

o plastificación. Además, en el proceso influyen otras propiedades inherentes al polímero, como su temperatura de transición vítrea (aquella en la que se produce un cambio en la fluidez sin modificaciones en la estructura molecular).

Sin embargo, la escisión de las cadenas en un polímero blando, como el polidimetilsiloxano, puede ocurrir también a temperaturas bajas y en contactos con poco rozamiento. Ello se debe al entrecruzamiento que experimentan dichas cadenas en la interfaz, lo que provoca su ruptura durante la separación. Ese entrecruzamiento aumenta en los polímeros de silicio y oxígeno a causa de la presencia de oligómeros (fragmentos de polímeros) y oligómeros cíclicos (aquellos con estructura de anillo). Estas sustancias existen en un equilibrio dinámico: sufren cambios constantes debido a la continua apertura y cierre de los enlaces entre el silicio y el oxígeno, pero carecen de carga neta. En el mecanismo de transferencia de material, la fuerza que gobierna la acumulación de carga aparece como consecuencia del aporte de energía mecánica durante el contacto.

En fecha reciente también se ha avanzado en el estudio de los contactos por frotamiento entre dos polímeros. En 2008, Chonyang Liu y Allen Bard, de la Universidad de Texas en Austin, y, de manera independiente, Toribio Otero, de la Universidad Politécnica de Cartagena, postularon la existencia de un mecanismo de transferencia de electrones tras observar que, una vez separadas las superficies, resultaba posible inducir en ellas ciertas reacciones electroquímicas que solo podían ser causadas por electrones. Sin embargo, dicha interpretación fue cuestionada en 2011 por Silvia Piperno y sus colaboradores del Instituto Científico Weizmann, en Israel, quienes propusieron un mecanismo de transferencia de iones basado en un intercambio de material con especies polares. Nikolaus Knorr, del Laboratorio de Ciencia de Materiales Sony de Stuttgart, también ha referido patrones de carga bipolar en otros contactos por frotamiento entre polímeros.

UNA RELACIÓN COMPLEJA

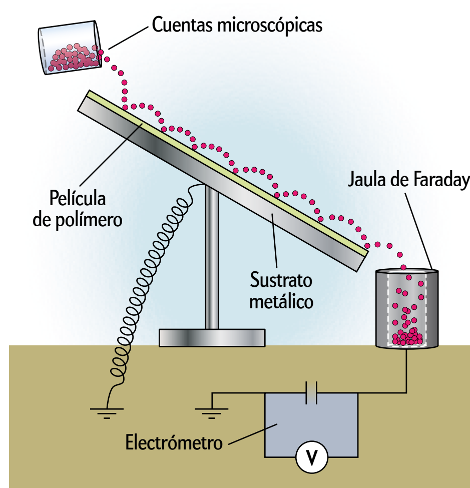
La carga triboeléctrica se produce por el contacto entre dos superficies. Sin embargo, el significado exacto de cada uno de estos términos con relación al proceso de carga no se encuentra bien definido. Mi interés al respecto se ha centrado en dos preguntas: la manera en que los mecanismos de generación de carga se relacionan con el grosor de las capas superficiales de un polímero (la «profundidad de penetración de carga») y cómo varía lo anterior con el tipo de contacto. En la mayor parte de los estudios realizados hasta ahora se ha ignorado el hecho de que, por regla general, la composición y morfología de los polímeros varían con la profundidad.

Se sabe que, cuando las láminas de un polímero se fabrican a partir de una disolución, los aditivos de baja energía superficial migran hacia la superficie. Durante mi época en Xerox utilicé este fenómeno para investigar la profundidad de penetración de carga. Para ello, se diseñaron varios polímeros cuya composición en la zona más superficial, determinada por espectroscopia de fotoelectrones por rayos X, difería de las composiciones conocidas en el núcleo del material. Después, sobre películas de polímero inclinadas y fijadas a placas de aluminio, se hacían caer en cascada pequeñas bolitas de 100 y 250 micrómetros, unas de metal puro y otras revestidas de polímero. Este método goza de probadas precisión y reproducibilidad para determinar la carga triboeléctrica. Cuando las cuentas rebotaban sobre la superficie, el contacto era ligero y muy breve, de unas 10 millonésimas de segundo. La sorpresa llegó cuando se descubrió que, mientras que la carga de contacto entre dos polímeros dependía de sus capas moleculares más externas, en el caso de un metal y un polímero se relacionaba con las capas más profundas de este último. La hipótesis fue que, en el primer caso, la acumulación de carga tenía lugar por transferencia de iones entre las superficies más externas, mientras que en el segundo se debía a electrones que penetraban en el seno del material por efecto túnel. Ello implicaba una relación entre el mecanismo de generación de carga y la profundidad de penetración de esta. Esta hipótesis casa bien con el hecho de que, en un polímero, los iones se adsorben en la superficie; en cambio, se cree que los electrones penetran en ellas.

Más tarde, a la vista de los indicios sobre la existencia de un nuevo mecanismo de transferencia de carga, propuse que los mismos resultados podían interpretarse en términos de transferencia de material. El contacto de una película de polímero con una superficie metálica dura arrancaría una capa más profunda que el contacto con otro polímero, más suave y blando. Por tanto, los mecanismos de intercambio de electrones, iones y material tal vez pudiesen ocurrir de manera simultánea, en función de la naturaleza de los materiales y las condiciones de contacto. En aquellos casos en los que intervienen un metal y un aislante, la transferencia de electrones ha sido bien establecida bajo circunstancias diversas. Para el contacto entre dos aislantes, la pregunta es si la transferencia de material constituye el mecanismo predominante o incluso el único.

Existen propuestas alternativas. Una de ellas introduce el concepto de fuerza o energía umbral, por debajo de la cual el intercambio de material resultaría insuficiente para provocar una transferencia de carga. Otros modelos proponen un *continuum* de clases de contacto en el que tendría lugar una transferencia simultánea de electrones, iones y material, con un predominio de esta última cuando aumenta la fuerza o la presión aplicada.

En este contexto resultan de interés los experimentos realizados en 1995 por Law y sus colaboradores, quienes mezclaron partículas de tóner revestidas con una sal de cesio junto con portadores cubiertos de polímero. Los investigadores observaron una dependencia lineal entre el intercambio de carga y el grado de transferencia de cesio en función del tiempo de mezclado, lo cual apoyaba con fuer-



Para estudiar la manera en que la composición vertical de un polímero afecta al proceso de acumulación de carga, sobre una placa metálica recubierta por una película de polímero se dejan caer cuentas microscópicas de metal o revestidas de polímero. Los objetos metálicos afectan en mayor medida a las capas profundas del polímero; un resultado que puede interpretarse en favor de la existencia de un mecanismo de transferencia de material.

SIGMA XI

za la existencia de un mecanismo de transferencia de iones de cesio. Por su propia naturaleza, los iones móviles se transferirían con mayor facilidad que los fragmentos de polímero. ¿Significaba ello que las fuerzas mecánicas entre el tóner y el portador resultaban demasiado débiles para que tuviese lugar una transferencia simultánea de fragmentos de polímero? ¿O existe una jerarquía de mecanismos de intercambio de carga, en la que varios de ellos contribuyen al proceso de acuerdo con su categoría hasta que se alcanza un límite de carga? En apoyo de esta hipótesis, el grupo de Law halló las mismas correlaciones entre el intercambio de carga y la transferencia de iones con portadores de metal puro. Ello indica que, cuando tiene lugar una transferencia de iones móviles, esta ocurre con preferencia frente a la transferencia de electrones; un resultado corroborado por otros experimentos en los que se ha observado una correlación con el trabajo de extracción del metal.

MATERIALES IDÉNTICOS

Un fenómeno que continúa sorprendiendo a los experimentadores nos lo proporciona el hecho de que la carga por contacto también se observa entre materiales con idéntica composición. En un artículo de revisión publicado en 2011, Daniel J. Lacks y R. Mohan Sankaran, de la Universidad Case Western Reserve, lo explicaban así: «Otra cuestión abierta hace referencia a la carga por contacto entre dos materiales aislantes con idénticas propiedades físicas; al no haber ninguna fuerza motriz aparente, no queda claro qué provoca la transferencia de carga». La carga entre materiales idénticos contradice las antiguas y excesivamente simplistas series triboeléctricas, las cuales clasifican los materiales en función de su propensión a adquirir carga de uno u otro signo. Según ellas, una sustancia acumularía carga positiva con respecto a todas las que la suceden en la serie, lo que implicaría la necesidad de composiciones distintas para que se genere una carga de contacto. No obstante, el fenómeno también se produce cuando dos polímeros idénticos se presionan o se frotan entre sí, de manera simétrica o asimétrica. El frotamiento asimétrico entre películas de polímero tiene lugar cuando un área reducida de uno de ellos entra en contacto con una superficie mayor del segundo. En tales casos, el sentido en que tiene lugar el proceso de carga depende de la naturaleza del material.

Como sucede con frecuencia, tal vez sean tales fenómenos inesperados los que acaben aportando información mecánica clave. Para explicar la carga entre materiales idénticos, hace un tiempo propuse extender la idea de que la profundidad desde la que se transfiere el material de un polímero aumenta con la fuerza aplicada. El frotamiento asimétrico genera fuerzas de diferente magnitud en cada superficie, por lo que el material se transferiría desde profundidades distintas. Dado que la constitución vertical de un polímero no suele ser homogénea, dicha asimetría daría lugar a un intercambio de materiales de composiciones diversas. Como resultado, aparecerían cargas netas de signo opuesto en cada superficie.

Como hipótesis alternativa, las diferencias en el grado y tipo de fuerza mecánica aplicada a cada superficie tal vez provoquen sutiles cambios en la mecanoquímica del proceso; es decir, en la clase de reacciones químicas que son inducidas por efectos mecánicos. En tal caso, los fragmentos ionizados de polímero en cada superficie presentarían composiciones dispares. Una idea similar podría explicar la carga por frotamiento simétrico o por presión entre polímeros idénticos, ya que cabe imaginar que en todo contacto se produzcan pequeñas asimetrías mecánicas accidentales. Tales procesos contribuirían también a la generación de carga entre materiales de diferente composición o dureza. A fin de validar estas hipótesis, quizá resulten de utilidad los polímeros de composición vertical inhomogénea descritos más arriba, ya que en tales casos la transferencia de materiales con composiciones diversas podría detectarse con facilidad.

La carga triboeléctrica de materiales idénticos también se observa entre partículas, como sucede en las tormentas de polvo o durante la manipulación industrial de sustancias granuladas. Una vez más, el fenómeno podría deberse a la aparición de contactos asimétricos causados por las diferencias de tamaño entre las partículas. Aquellas con dimensiones mayores suelen adquirir carga positiva, mientras que a las más reducidas les ocurre lo contrario. Para explicarlo, se ha propuesto un mecanismo de transferencia de electrones según el cual aquellos procedentes de un estado superficial de energía elevada en una partícula pasarían a ocupar, tras la colisión, un estado menos energético en la otra. Hasta ahora se ha supuesto que la composición y otras características superficiales no dependen del tamaño de las partículas, pero esta hipótesis bien podría mostrarse incorrecta.

Hoy en día existe un interés creciente por crear materiales que no se carguen por contacto. En parte, ello se debe a la progresiva miniaturización de los equipos electrónicos, lo que los torna más vulnerables ante las descargas, incluso aquellas de poca magnitud. Otra razón para investigar la triboelectricidad la hallamos en la investigación básica, la cual se propone entender los fenómenos naturales sin ninguna aplicación concreta en mente. El estudio de la interacción entre la composición de los materiales y las diferentes clases de contacto mecánico debería arrojar luz sobre varias cuestiones clave. Entre ellas, qué factores afectan a la contribución iónica frente a la transferencia de material cuando intervienen polímeros con iones móviles y, en los casos en los que toma parte un metal, qué determina el peso de la contribución electrónica frente a la transferencia de material.

Por otro lado, los últimos avances han puesto de relieve la necesidad de aplicar conceptos de mecanoquímica, fundamentales para entender los mecanismos de transferencia de material. La integración de todos estos frentes dará lugar a un programa de investigación multidisciplinar. Cada vez más, la resolución de problemas complejos requiere el concurso de disciplinas diversas. Durante los últimos cincuenta años, el número de autores que firman un artículo científico ha venido aumentando a un ritmo medio de un 20 por ciento cada diez años. Parece probable que el área de la triboelectricidad, antaño circunscrita al ámbito de la física, continúe creciendo y beneficiándose de la aportación de otras ciencias.

© American Scientist Magazine

PARA SABER MÁS

Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces. L. S. McCarty y G. M. Whitesides en *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 47, págs. 2188-2207, 2008.

The mosaic of surface charge in contact electrification. H. T. Baytekin, et al. en *Science*, vol. 333, págs. 308-312, 2011.

Contact electrification of insulating materials. D. J. Lacks y R. M. Sankaran en *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 44, pág. 453001, 2011.

Triboelectric charging of insulating polymers: Some new perspectives. M. W. Williams en *AIP Advances*, vol. 2, pág. 010701, 2012.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Minería artesanal

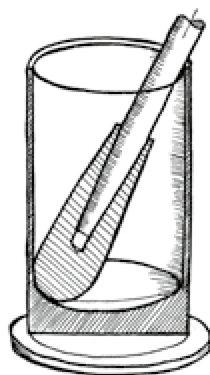
La industria minera centra gran parte de su esfuerzo en separar especies minerales para un óptimo beneficio. Emular sus técnicas resulta altamente instructivo

La minería constituye una actividad cardinal para nuestra civilización. Mediante la perforación del subsuelo obtenemos materias primas que luego serán prolijamente transformadas hasta convertirse en productos manufacturados. Pero la minería es algo más que simple excavación. Es también someter el mineral arrancado a distintos métodos de separación y concentración hasta hacer económicamente viable su tratamiento metalúrgico. Tanto es así, que resulta normal que la mitad del precio de la mena metálica corresponda precisamente a los tratamientos necesarios para separarla de la ganga y que en algunas especies minerales estratégicas esa proporción sea muy superior. Como es lógico, la industria se ha preocupado de mejorar constantemente estos procesos. Ello ha convertido en rentables explotaciones con una ley bajísima, es decir, con pocos gramos de mineral por tonelada de roca extraída.

El aficionado a la mineralogía, a la metalurgia, el coleccionista de elementos químicos e incluso el minero autárquico sacarán provecho de remedar a pequeña escala los procesos industriales. De hecho, se estima que alrededor de quince millones de personas, solo en Latinoamérica, se dedican de una u otra forma a la extracción minera artesanal. Una pequeña mejora en los procesos de concentración redundaría en una mayor rentabilidad e incluso en una reducción de la contaminación ambiental, ya que el uso del mercurio sigue siendo un problema.

Para convertirnos en mineros, lo primero que debemos hacer es proveernos de la materia prima. Podemos obtener muestras minerales de varios kilos con toda facilidad y sin causar perjuicio alguno. Recomiendo buscar en arenas de playa, río, materiales de desmontes, escombreras de mina, afloramientos minerales puntuales o taludes de la red viaria. El esfuerzo se verá recompensado por una miríada de muestras diversas que incluirán materiales de interés puramente mineralógico (pequeños cristales de cuarzo, corindón, granate) o, mejor aún, minerales metálicos que puedan manipularse químicamente.

Mortero

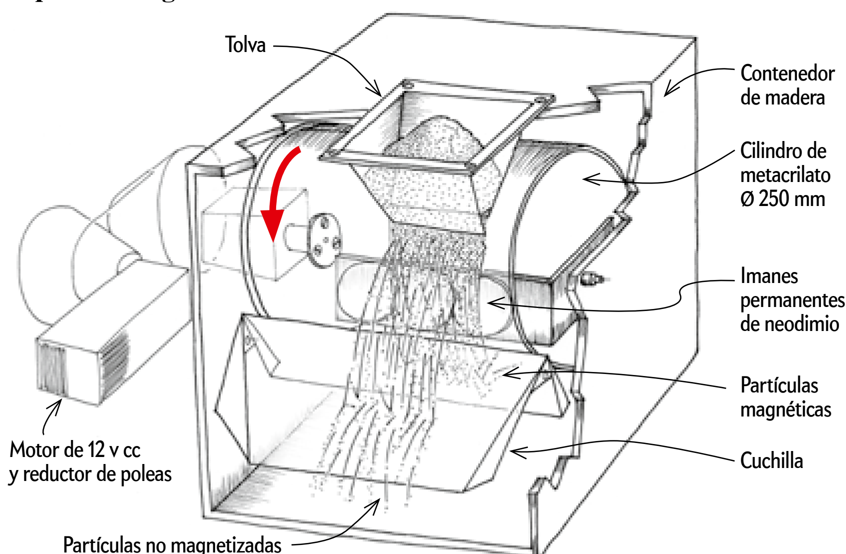


Desde la antigüedad sabemos que un buen tratamiento de la mena pasa por la molturación de la misma. Quebrar la roca libera las partículas de tamaño reducido y, por tanto, facilita la separación de las mismas. Cuanto más fino sea el producto obtenido, mejor rendimiento obtendremos, con el límite lógico de la sobremolienda. Con todo, el uso del mortero no siempre es necesario (pensemos en la explotación de placeres aluviales o costeros, donde los minerales se presentan en forma de arenas).

En la industria se utilizan trituradores de los más diversos diseños, fragmentadoras de mandíbulas o molinos de bolas y rodillos, siempre activados por algún motor. En mi caso, me he conformado con un almirez manual que realicé en acero inoxidable. El fondo cóncavo y el mazo en forma de gota impiden que el material permanezca aglomerado; vale la pena disponer de varios modelos de distinto tamaño.

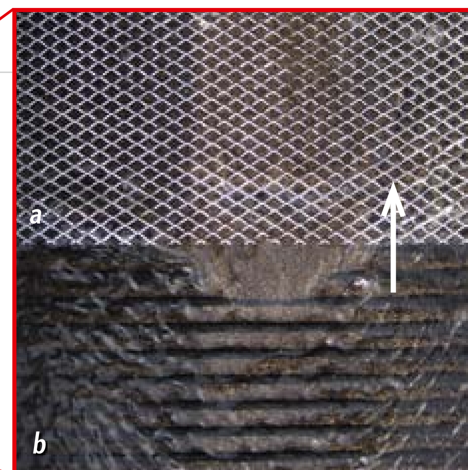
Pese a que el experimentador puede servirse de un solo mortero, siempre necesitará varios tamices. Parte de los métodos que discutiremos más adelante se basan en el distinto comportamiento que presentan las partículas de mineral y ganga cuando se encuentran en el seno de un fluido. Por ello, si queremos conseguir una buena separación deberemos partir de una excelente clasificación granulométrica. Además, comprobaremos que un simple cribado nos permite enriquecer notablemente ciertas fracciones, ya que a menudo la especie mineral que buscamos tiene un tamaño característico. Un juego de tamices de laboratorio sería la mejor

Separador magnético



MARC BOADA





Canaleta de tres metros de longitud. Distintas texturas recubren el fondo: el inserto muestra un zona con listones de goma (*a*) y otra, contigua, con moqueta negra tapada con una rejilla (*b*). La flecha indica el sentido del flujo del agua.

MARC BOADA

opción, lástima que su elevado precio escapa a nuestro reducido presupuesto. Recurriremos al ingenio para surtirnos de todo lo necesario.

En talleres, desguaces y ferreterías podemos adquirir tejidos metálicos más o menos tupidos, chapas perforadas, e incluso coladores de cocina que se adapten a nuestras necesidades. En los proveedores de material de construcción encontraremos surtidos completos de harneros de gran diámetro. Mediante una adecuada combinación de todos ellos podremos separar el material en cinco o diez fracciones bien calibradas. En el conjunto de cedazos que he construido para mi taller uno encaja holgadamente dentro del siguiente; ello me permite apilarlos y reducir el tiempo de tamizado.

Terminada la clasificación por tamaños, podemos acometer las tareas de concentración. La gran industria extractiva utiliza extensamente los métodos de flotación, imprescindibles en algunas explotaciones. En estos, el mineral finamente molido se introduce en un tanque de agua aireado, junto con sustancias tensioactivas y colectores (xantatos o *aerofloats*), que se adhieren selectivamente a la mena que queremos separar; esta flota y forma una espuma que se retira mecánicamente. La ganga se acumula en el fondo.

Sin embargo, ese método suele escapar a las posibilidades del minero aficionado. Recurriremos a los procesos puramente físicos. Quizás el más accesible sea la separación magnética. Puesto que bastantes minerales de interés científico son sensibles al campo magnético, si sometemos una muestra a la influencia de unos imanes permanentes o, mejor, al campo de unos electroimanes regulables, podremos separar las especies minerales en orden a su susceptibilidad magnética.

Puede construirse un maravilloso —por eficaz— separador magnético con unos imanes de neodimio de buen tamaño. El aparato es sencillo: consiste en un cilindro, nunca de hierro, que gira sobre un eje horizontal al que se fija por uno de sus extremos, quedando el otro libre y abierto. En mi caso, he usado un tubo de metacrilato de 250 milímetros de diámetro y 300 de longitud.

En el interior del cilindro se colocan, mediante un soporte independiente, unos imanes permanentes; por ejemplo, tres unidades de 60 milímetros de diámetro y 5 milímetros de espesor. En el exterior, más o menos a la altura de los imanes interiores, una cuchilla separa las partículas en dos grupos: las magnéticas por un lado y las amagnéticas por otro. El tubo gira gracias a un motor de corriente continua procedente de un limpiaparabrisas de automóvil. Su función consiste en retirar del campo magnético la fracción más sensible; mediante el ajuste de la velocidad, la distancia de la cuchilla y la altura de los imanes podremos separar con excelente precisión varios kilos de material en pocos minutos.

Las arenas negras de muchas playas de nuestro país rinden volúmenes considerables de magnetita. Podemos beneficiar fácilmente la cantidad de magnetita necesaria para su uso como baño termostático a alta temperatura, como acumulador de calor en pequeñas instalaciones termosolares o como fuente mineral de hierro, para su reducción con carbón vegetal o aluminio. [*Véase* «Tesoros en la arena», por Marc Boada; Investigación y Ciencia, agosto de 2011.]

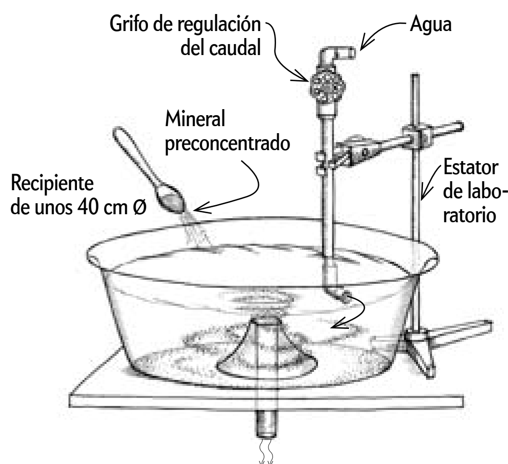
Si el mineral que queremos extraer no es magnético pero tiene una densidad distinta de la ganga, procederemos a la separación gravimétrica. Por lo corriente, esta se realiza bajo un flujo de agua. Un método de sobrada eficacia es el lavado en batea de arenas selectas; pero a nadie se le escapa que, si bien preciso, resulta tedioso y lento. Este problema fue ya detectado en la antigüedad. Ello estimuló el desarrollo de sistemas como el celebérrimo vellocino de oro. Se basa en sumergir en un río aurífero una piel velluda, fijada con piedras y estacas, de forma que las densas partículas auríferas queden atrapadas entre las pilosidades (las piedrecillas más ligeras corren sobre estas).

Hoy el vellocino ha sido sustituido por la canaleta (*sluice*), un pequeño canal de madera, aluminio o plástico, de 20 o 30 centímetros de ancho, 8 o 10 de fondo y

uno o dos metros de longitud (las versiones industriales llegan a las decenas de metros de longitud), que se instalan directamente sobre el lecho del río. Si regulamos la entrada de agua por el extremo superior, ajustamos la pendiente y mantenemos un aporte regular de mineral, retendremos en el interior la parte más densa.

El fondo de las canaletas se recubre con distintos materiales que retienen las partículas más pesadas. En la parte alta suelen utilizarse pequeños listones (*riffles*), con una sección rectangular, semicircular o en diente de sierra. Son muy útiles las placas de goma con ondulaciones que se usan en la cimentación de maquinaria, o ángulos metálicos de algún centímetro de sección colocados siempre perpendiculares al flujo. En la zona media da buen resultado la moqueta de pelo más bien largo, las alfombrillas típicas para limpiarse la suela de los zapatos o las del interior de los automóviles.

Esos materiales retienen sedimentos solo hasta su límite de saturación. Para aumentar su capacidad, podemos colocar sobre ellos una rejilla metálica de tipo *deployé* o desplegada (se fabrica mediante incisiones regulares que luego permiten estirar la chapa hasta producirle ojales romboidales). Este material se fabrica en varios metales y dimensiones. En mi caso, utilizo una canaleta fija de tres metros. Para el lavado y concentrado de arenas negras recubro la moqueta de la mitad inferior con chapa desplegada de aluminio con ojal de 6 milímetros; para eliminar las piedrecillas del carbón vegetal o para lavar minerales de granulometría diversa me sirvo de chapa de hierro, también expandida, de 12 milímetros.



Vórtice para la separación gravimétrica.

La regulación de la inclinación puede realizarse, en las pesadas canaletas de laboratorio, mediante un pequeño gato hidráulico; con la ayuda de un clinómetro podremos acotar con precisión la pendiente según el material que tratemos. Con este sencillo artilugio lavaremos decenas de kilos de material en poco tiempo.

Luego extraeremos las moquetas, *riffles* y chapas, y lo sacudiremos todo dentro de un gran barreño de agua, en el fondo del cual se acumulará la fracción concentrada. Observemos que este método de separación es discontinuo. Nos permitirá obtener unos centenares de gramos, quizás algún kilo, de concentrado.

Como es lógico, existe siempre la tentación de volver a repasar en la canaleta los sobrantes de la primera operación. Cierto es que los relaves de los mixtos y colas de cualquier proceso de concentración siempre son productivos, pero deberemos valorar si el esfuerzo vale la pena. Retrabajar los estériles mineros abandonados hace siglos por una minería primitiva en muchos puntos de Sudamérica puede ser muy rentable, pero con los procedimientos de hoy, incluso los artesanales, podemos conseguir en dos o tres ciclos de lavado separaciones próximas al máximo teórico, al menos con los métodos que siguen.

El concentrado de la canaleta contiene impurezas en grado variable. En un experimento para recuperar galena o casiterita, el concentrado obtenido es muy puro, pero si lo que buscamos es oro aluvial solo habrá unas pocas partículas en medio de un gran volumen de arena densa. En este caso es típico recurrir de nuevo a la batea, ya que resulta especialmente eficaz. Si buscamos especies minerales de las que esperamos encontrar centenares de gramos o algún kilo, la batea deberá sustituirse por otro método más rápido.

Los ingenieros de minas han pergeñado métodos continuos que sustituyen las canaletas. A título de ejemplo citaremos los espirales, canales helicoidales de varios metros de altura por donde se desliza el mineral en suspensión acuosa mientras la fracción densa escapa por una ranura próxima al perímetro. También son habituales los Jigs y las cribas móviles, sumergidas en agua y sujetas a fluctuaciones cíclicas o pulsaciones en el volumen del líquido; en estas, las partículas ligeras impulsadas por el fluido ascienden sobre las densas y son extraídas mediante una pequeña corriente de agua que escapa por aberturas laterales. En algunas operaciones se utilizan hidrociclones, cilindros en los que un flujo de agua cargado con mineral (pulpa) entra tangencialmente generando un vórtice que arroja las partículas hacia el perímetro exterior mientras que el agua, ya libre de material denso, escapa por la parte central de la cara superior. Sin embargo, su construcción los hace más adecuados para la concentración o deslamado que para la separación de la ganga —al menos en un prototipo que construí con un resultado más bien frustrante.

Ante el escaso éxito del ciclón, he explorado un aparato conocido de antiguo, mucho más simple y de resultado garantizado. Lo he bautizado como vórtice, ya que su principio de funcionamiento es exactamente ese, un remolino de idéntica factura al que se produce al vaciar la bañera doméstica, eso sí, con algunos aditamentos que lo convierten en un separador óptimo para preconcentrados procedentes de la canaleta.

Para construir un vórtice tomaremos un barreño de plástico de unos 40 centímetros de diámetro y 20 de profundidad. En el fondo y justo en su centro perforaremos una abertura circular de 3 o 4 centímetros que remataremos con cualquier objeto de sección campanuda. Servirá una base de trofeo, un embellecedor de lámpara o alguna moldura con una forma que recuerde un hiperboloide de revolución. En mi caso torneé un cilindro de baquelita hasta conseguir un perfil muy próximo a la boca de una trompeta, que pegué con epóxido al fondo del barreño. Luego, mediante un soporte exterior —un estator de laboratorio resulta óptimo—, introduciremos un tubo de acodado que inyectará agua tangencialmente. Al poco de funcionar, se generará un vórtice rápido, laminar y bellísimo. Acto seguido, aportaremos el mineral procedente de las operaciones de preconcentración anteriores, cernido con precisión y mojado, poco a poco y sin prisa.

Las partículas más ligeras arrastradas por el flujo de agua escapan por el agujero central; las más densas permanecen en el fondo. Tomando precauciones especiales, como un nivelamiento excelente y un flujo regular y estable, es posible separar especies minerales con diferencias de densidad sutiles. Y si regulamos el caudal de agua, conseguiremos lavar un amplio espectro de granulometrías, obteniendo concentrados de ley suficiente para un tratamiento metalúrgico directo. Empezará entonces un nuevo proceso puramente químico, lejos, eso sí, de los bellísimos paisajes donde la naturaleza esconde sus maravillosos minerales.

MARC BOADA

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

Todo o nada

Leyes cero-uno, fenómenos de umbral y transiciones de fase

En el infinito, y en contra de nuestra intuición, a veces las cosas se simplifican. Aunque los matemáticos usan a menudo objetos finitos como aproximaciones al infinito, hay ocasiones en las que el límite infinito resulta más fácil de abordar. Tal es el caso de un sumatorio intratable que, al reemplazarlo por una integral, se convierte en un cálculo sencillo. Pero, más allá de estos ejemplos, existen sistemas u objetos matemáticos que, llevados al infinito, muestran propiedades que resultan siempre ciertas o siempre falsas.

Tal vez el resultado más conocido al respecto sea la aparición de una componente gigante en grafos aleatorios, demostrada en 1960 por los matemáticos Paul Erdös y Alfréd Rényi. Imagine que coloca sobre una mesa n botones (nodos, en lenguaje de teoría de grafos). Para formar una red o grafo aleatorio, Erdös y Rényi nos proponen unir con un hilo cada posible par de botones con probabilidad p. Si p es cero, todos los nodos quedarán aislados; si p es uno, todos estarán enganchados con todos.

Para valores intermedios de p, aparecerán múltiples grupos de botones unidos entre sí pero separados del resto. Si tiramos del hilo de uno de esos conjuntos, arrastraremos todos los botones que lo forman, pero ninguno más. El tamaño de tales grupos será muy variopinto. Sin embargo, Erdös y Rényi demostraron que, a medida que n tiende a infinito, para valores de p que satisfagan la condición $np > 1$ aparece una componente interconectada gigante: un grupo al que pertenece la mayor parte de los nodos. Así que, en el límite de infinitos nodos, si tiramos de un hilo cualquiera arrastraremos todos los botones de la mesa. Esto corresponde a un caso de ley cero-uno: en el infinito, por debajo de cierto valor, la probabilidad de encontrar una componente gigante es cero; por encima, uno.

Los teóricos de la computación describirían la situación anterior como un fenómeno de umbral. En problemas de optimización combinatoria en los que hay que encontrar un objeto determinado entre una gran cantidad de posibilidades, resulta frecuente toparse con fenómenos de umbral en el rendimiento de los algoritmos de búsqueda. Suele darse una fase en el espacio de parámetros en la que la solución no existe, y otra donde el algoritmo la encuentra con facilidad. La transición entre ambos regímenes puede ocurrir de manera abrupta, remedando en muchos aspectos las transiciones de fase de la física, como la que tiene lugar cuando calentamos agua hasta el punto de ebullición.

No deja de resultar sorprendente que tales transiciones bruscas aparezcan en situaciones tan dispares y alejadas. Hace unas dos décadas que matemáticos como Assaf Naor, teóricos de la computación como Dimitris Achlioptas y físicos como Stephan Mertens, por citar al vuelo algunos nombres, rompieron las fronteras de sus respectivas disciplinas para atacar estos problemas usando indistintamente herramientas de las tres áreas.

Cifras y letras

En abril de 2008, Juan M. R. Parrondo publicaba en esta sección una columna titulada «Cifras y letras», en referencia al popular concurso televisivo. En ella describía un astuto código informático desarrollado por el matemático Pedro Reina, el cual permitía resolver de manera automática el desafío numérico del programa.

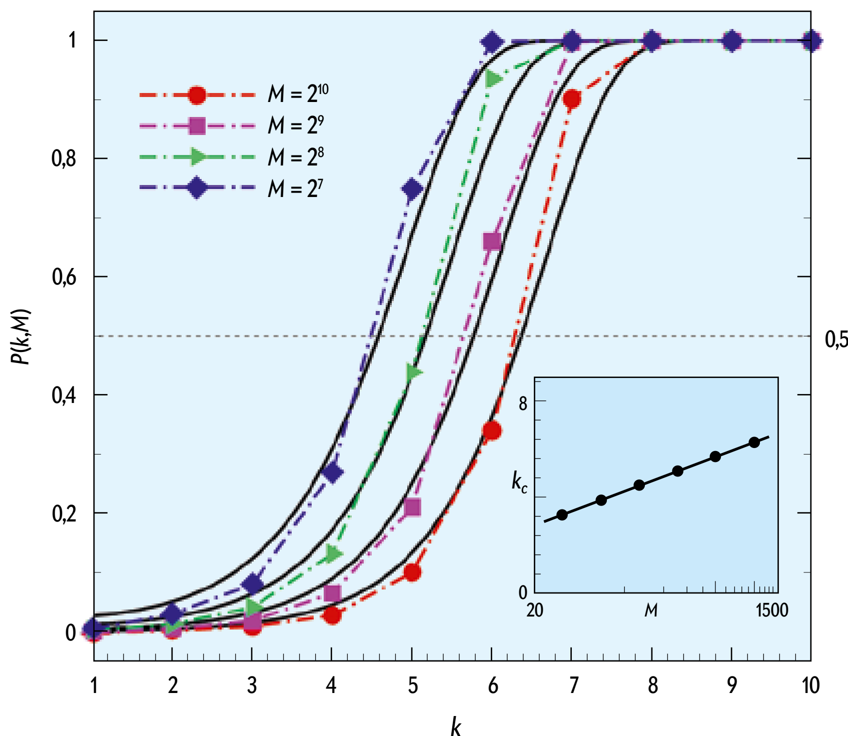
Inspirado por su lectura, el físico Lucas Lacasa propuso la siguiente variante. Dado un conjunto de números $\{1, 2, ..., M\}$, se eligen al azar k de ellos, así como un «número objetivo» T. El juego se gana si existe una combinación aritmética de los k números escogidos cuyo resultado sea T. Las operaciones permitidas son la suma, la resta, la multiplicación y la división. Al operar con ellos, cada uno de los k números puede usarse solo una vez, pero no es obligatorio utilizarlos todos.

Consideremos el caso en el que $M = 100$ y $k = 3$. Del conjunto $\{1, 2, ..., 100\}$ elegiremos al azar 3 números y un número objetivo T. Supongamos que obtenemos 2, 5 y 10, y que $T = 25$. Hemos de encontrar una combinación aritmética de 2, 5 y 10 cuyo resultado sea 25. Dado que $(5 \cdot 10)/2 = 25$, en este caso habremos ganado. Desde el punto de vista de la computación, este juego puede interpretarse como un problema de decisión: hemos de determinar si la igualdad se satisface o no a través de un algoritmo que busque de manera exhaustiva todas las combinaciones aritméticas posibles de los k números.

Fijados M y k, ¿a cuánto asciende la probabilidad $P(k,M)$ de ganar? Consideremos primero dos casos extremos. Si $k = 1$, solo acertaremos si T coincide con el único número elegido, por lo que $P(k,M) = 1/M$, una probabilidad muy baja si M es grande. Sin embargo, dicha probabilidad aumentará con k. Parece plausible que, si k toma un valor lo suficientemente elevado, la probabilidad de acertar se acerque mucho a 1. Este razonamiento fue el que llevó a Lacasa a sospechar que tal vez se escondiese en el juego una transición de fase.

Podemos intentar validar nuestra hipótesis con el siguiente experimento numérico: fijamos valores para M y k, dejamos que un ordenador calcule todas las combinaciones aritméticas posibles de los k números, repetimos el juego 10.000 veces y promediamos el resultado. La probabilidad $P(k,M)$ se calcula entonces como el cociente entre el número de aciertos (las veces que el ordenador halla una combinación aritmética de los k números que proporciona T) y el de intentos (10.000).

La primera gráfica muestra el resultado de nuestro experimento. Como había-



Probabilidad de que una combinación aritmética de k números tomados al azar del conjunto {1, 2, ..., M} nos dé un número escogido de antemano. Los colores indican los valores obtenidos en distintos experimentos numéricos; las sigmoides negras, los de una función aproximada calculada a partir de hipótesis sencillas. El valor «crítico» k_c para el que $P(k,M)$ toma el valor 1/2 depende de manera logarítmica de M (*inserto*): $k_c(M) = 0{,}84 \cdot \log(M) + 0{,}39$.

mos intuido, para valores pequeños de k la probabilidad de ganar es ínfima, pero cuando k es grande se aproxima mucho a la unidad. La figura superior muestra cómo las curvas de probabilidad sufren una transición abrupta entre valores bajos y altos. Al aumentar M, la curva se desplaza hacia la derecha, pero su comportamiento cualitativo no cambia.

Para describir mejor dicha deriva, observemos que para cada número M existe un valor crítico k_c en el que la probabilidad de obtener T es igual a 1/2. En el inserto de la gráfica hemos representado k_c en función de M en ejes semilogarítmicos. Al ajustar los datos observamos una clara relación logarítmica: un ajuste lineal nos revela que $k_c(M) = a \log(M) + b$, donde a y b denotan constantes dadas por $a = 0{,}84$ y $b = 0{,}39$.

Resolver sin calcular

Hallar con exactitud la probabilidad $P(k,M)$ nos pondría ante un problema combinatorio endiablado. Sin embargo, podemos intentar estimarla de forma heurística. Llamemos $N = N(k,M)$ a la cantidad media de números diferentes que podemos generar con combinaciones aritméticas de nuestros k números y cuyo resultado caiga dentro del conjunto {1, 2, ..., M}. Dichos números no serán independientes entre sí, puesto que los hemos obtenido a partir de las combinaciones aritméticas de k números fijados de antemano. Sin embargo, a modo de aproximación, comencemos por suponer su independencia mutua.

En tal caso, la probabilidad de obtener T resultará equivalente a la de extraer dicho número del conjunto {1, 2, ..., M} tras N intentos aleatorios. Puesto que la probabilidad de acertar en un solo intento es igual a $1/M$, la de lograr nuestro objetivo al menos una vez tras N intentos vendrá dada por:

$$P(k,M) = 1 - \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{N} \approx 1 - \exp\left(-\frac{N}{M}\right),$$

donde en el segundo paso hemos supuesto que M es un número muy elevado, lo cual nos permite aproximar la función exponencial $\exp(-1/M) = e^{-1/M}$ mediante el binomio $(1 - 1/M)$.

Observemos ahora que, si k es pequeño, esperamos que N también lo sea. De acuerdo con la ecuación anterior, ello resultaría en una probabilidad de éxito baja. Y al revés: un valor de k elevado implica lo propio para N, por lo que obtendríamos una probabilidad alta de acertar. Así que, al menos cualitativamente, parece que vamos por buen camino.

Ignoramos la forma funcional de $N(k,M)$. Sin embargo, parece razonable suponer que la cantidad de números distintos que podremos generar crecerá de manera exponencial con k y con M. También intuimos que, a medida que k aumente, la proporción de números que caerán dentro del conjunto {1, 2, ..., M} disminuirá. De modo que una estimación razonable (*Ansatz* es el término alemán que usan físicos y matemáticos) podría ser:

$$N(k,M) = \frac{\exp\left(r(M)\cdot k\right)}{k},$$

donde hemos añadido una dependencia funcional con M desconocida a través de la función $r = r(M)$. Rogamos al lector que no se asuste por el malabarismo: si nuestro *Ansatz* es una metedura de pata, quedará patente en los experimentos numéricos.

¿Cómo podemos evaluar la función $r(M)$? Recordemos que habíamos definido el valor crítico k_c como aquel que satisfacía que $P(k_c,M) = 1/2$. Si evaluamos $N(k,M)$ en $k = k_c$ e introducimos el resultado en nuestra expresión para la probabilidad, podremos despejar la expresión de $r(M)$ cuando $k = k_c$. Con ayuda de un lápiz y un papel, el lector comprobará con facilidad que nuestra ansiada expresión para la probabilidad de ganar viene dada por:

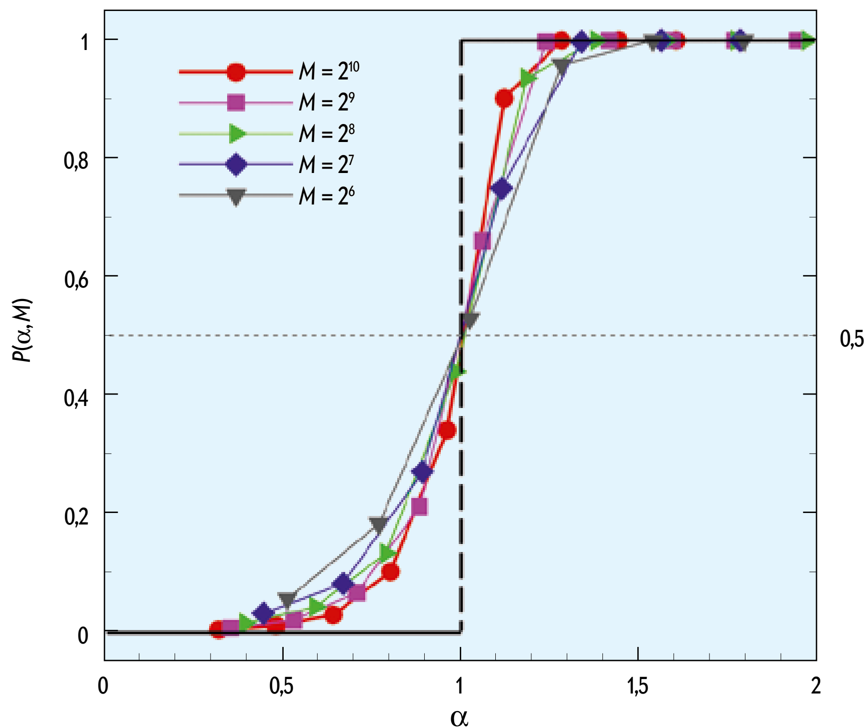
$$P(k,M) = 1 - \exp\left(-\frac{\exp\left(\frac{k}{k_c}\log\left(k_c M \log 2\right)\right)}{kM}\right),$$

donde el valor crítico k_c es una función de M que debe sustituirse por el ajuste lineal que habíamos calculado al principio: $k_c(M) = 0{,}84 \cdot \log(M) + 0{,}39$. En la gráfica hemos representado nuestra solución en forma de curvas continuas en negro. El acuerdo entre teoría y experimentos no está nada mal; sobre todo, teniendo en cuenta el número de suposiciones suicidas que hemos hecho.

Límite termodinámico

Pero ¿dónde está el comportamiento todo o nada, la ley cero-uno? Para encontrarlo,

CORTESÍA DEL AUTOR



Comportamiento de la función de probabilidad expresada en términos del parámetro de control intensivo $\alpha = k/k_c$. En el límite en el que el tamaño *M* del sistema tiende a infinito (*línea negra*), la probabilidad de acertar es siempre nula cuando $\alpha < 1$, y siempre uno cuando $\alpha > 1$.

debemos preguntarnos qué ocurre con $P(k,M)$ cuando el tamaño M del sistema y el parámetro de control k tienden a infinito; lo que un físico denominaría el «límite termodinámico».

Puesto que k_c depende logarítmicamente de M, crecerá sin límite a medida que lo haga M. Un físico clasificaría k_c como parámetro extensivo, ya que, al igual que la masa o el calor, aumenta con el tamaño del sistema. Una manera de sortear esta cuestión consiste en definir un parámetro de control intensivo. El equivalente físico correspondería a cantidades como la densidad (masa por unidad de volumen) o el calor específico (calor por unidad de masa).

En nuestro caso, en lugar de utilizar k, emplearemos el parámetro intensivo $\alpha = k/k_c$ y expresaremos $P(k,M)$ como $P(\alpha,M)$. De esta manera, nos aseguraremos de que el punto crítico siempre se encontrará en $\alpha = 1$ con independencia del valor de M.

Cuando realizamos esa transformación, las curvas para distintos valores de M aparecen centradas alrededor de $\alpha = 1$, tal y como podemos observar en la segunda gráfica. Vemos que, al aumentar M, la transición se va haciendo cada vez más abrupta. De hecho, si tomamos el límite en el que M se torna infinito, obtenemos que $P(\alpha,M)$ se convierte en una función escalón: una cuyo valor siempre es 0 cuando $\alpha < 1$, y siempre 1 para $\alpha > 1$.

En el infinito, lo que era una expresión más bien amedrentadora para $P(k,M)$ se transforma en una función que solo toma los valores cero o uno. Nuestro juego se ha simplificado hasta el punto de convertirse en un todo o nada: o bien nos resultará imposible obtener T, o bien lo lograremos con total seguridad. Sin duda, un pasatiempo carente de interés para un programa televisivo.

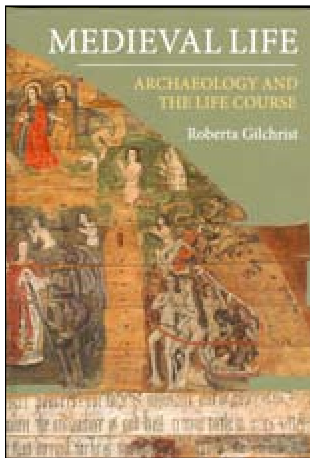
CORTESÍA DEL AUTOR

PARA SABER MÁS

Cifras y letras. Juan M. R. Parrondo en *Investigación y Ciencia* n.º 379, abril de 2008.

The nature of computation. C. Moore y S. Mertens. Oxford University Press, 2011.

Phase transition in the countdown problem. Lucas Lacasa y Bartolo Luque en *Physical Review E* 86, 010105(R), 2012. Disponible en **arxiv.org/abs/1206.2876**



MEDIEVAL LIFE. ARCHAEOLOGY AND THE LIFE COURSE

Por Roberta Gilchrist. The Boydell Press, Woodbrige, 2012.

Nuevas tendencias en arqueología

El caso medieval

Hasta que llegó *Investigación y Ciencia* la arqueología permanecía confinada a los medios humanistas. En España predominaba una arqueología cultural. No había, entre los docentes, ni geólogos que explicaran la naturaleza y propiedades de los minerales de transacción comercial o los materiales empleados en la construcción, ni químicos que enseñaran el proceso de combustión, ni biólogos que indicaran los equilibrios del ecosistema, ni cuáles eran las matemáticas empleadas en el diseño del plan de una ciudad, de un templo o de un palacio. Se echaba en falta mayor atención a los temas demográficos. O a la vida diaria. De ahí el interés del libro de cabecera, que aborda el curso del hombre, la familia y la comunidad de la cuna a la tumba. Al más allá, cuando se ocupa de los ritos que daban sentido a su vida y de la preparación para la muerte y la vida ultraterrena. Y donde por Medievo se entiende un extenso lapso temporal, de 1050 a 1450, obligado por la imprecisión de la datación de las pruebas testimoniales.

El trasfondo de ese paso de los días son el cuerpo, la casa, la comunidad parroquial y el cementerio, que aportan también las fuentes materiales: osteología, indumentaria, iconografía, cerámica y otras. El concepto de trayectoria vital, convertido aquí en hilo conductor, integra el envejecimiento con la memoria ritual y cultura material. Una trayectoria que alcanza su momento álgido en la treintena, la edad perfecta en lo intelectual y lo espiritual para el hombre del Medievo. En el ecuador de los cuarenta, se iniciaba el descenso hacia la vejez, según corrobora el registro óseo. Sabemos que la experiencia del envejecimiento es social y biológica. Y suele distinguirse entre una edad cronológica, que se mide mediante unidades de calendario, una edad social, que refleja la conducta normativa que se impone culturalmente a cada grupo, y una edad fisiológica, un constructo médico que estima los niveles de capacidad o de entorpecimiento funcional.

Para el medieval, la vida es un *continuum*, en el hombre y la mujer, aunque con distinto estatuto según el rol social. Esa trayectoria arrancaba desde la concepción y antes (matrimonio), con prácticas materiales asociadas, y se prolongaba hasta las estrategias seguidas para mantener la memoria del difunto y su bienestar ultraterreno. Además, la doctrina del purgatorio reforzó el sentido de que la muerte no era el final de la vida, sino un estado de transición en el ciclo vital. En cierto modo, el difunto era considerado un grupo social separado o incluso un grado de edad.

Si en la Antigüedad clásica grecorromana la esfera social de las mujeres crecía con la edad y su poder sobre los suyos y el hogar aumentaba hasta dominar tres generaciones, las excavaciones en los cementerios anglosajones y merovingios nos revelan que las mujeres ancianas eran enterradas con muy pocos objetos en la tumba, una tendencia que se interpreta como una señal de pérdida de poder y autoridad, coincidente con la menopausia. La fertilidad reproductiva definía, pues, el valor social de las mujeres en los inicios del período medieval. En otro orden, el estudio osteológico de restos humanos procedentes de las parroquias de Wharram Percy y de Burton-upon-Humber aporta pruebas de que una nutrición deficiente prolongó el período de desarrollo juvenil.

Las tumbas de los niños, que no suelen estar bien representadas en los cementerios vikingos, incrementan su número con la conversión al cristianismo. El cementerio de Fjälkinge corresponde a ese período de conversión y destaca, por ese fenómeno, la elevada proporción de tumbas infantiles: de 127 individuos enterrados, 78 eran niños menores de 12 años y 65 de estos, infantes de menos de un año de edad. Una treintena de los niños que murieron con menos de dos años fueron sepultados con una sencilla vasija cerámica, situada en la cabeza o a los pies de la tumba, donde había restos de leche animal y hortalizas. Se ha interpretado la situación de esas vasijas como referencia al rito vikingo de la primera alimentación que incorporaba al recién nacido al hogar y a la línea familiar. El cementerio de Fjälkinge reúne numerosos rasgos del contexto cristiano medieval; con el tratamiento funerario especial de los niños menores de dos años, al recién nacido se le bautiza, incorporándolo así a la comunidad parroquial.

La indumentaria y el acicalamiento eran esenciales para el medieval. La abundancia de pelo se tomaba por madurez sexual y fertilidad; su ausencia, por abstinencia sexual o penitencia. Se prestaba particular atención a la cabeza, desde el bautismo hasta la extremaunción. Ojos y boca constituían las puertas entre el cuerpo y el alma; creíase que en el beso se mezclaban los espíritus de dos personas. Para identificar una persona, el medieval reparaba también en joyas, cinturones, pulseras, pendientes, colgantes, camafeos, etcétera. Sin olvidar los gestos, la postura, el movimiento y las formas de comportarse entre las cualidades de una persona. Por su parte, el estudio arqueológico de la religión medieval ha extendido nuestro conocimiento y revisión de las categorías tradicionales de lo sagrado y lo profano. La arqueología de la devoción doméstica revela el nexo estrecho entre acción ritual e incorporación, por ejemplo en el uso de amuletos y materiales ocultos con los que se pretendía proteger el cuerpo en momentos críticos de la trayectoria vital, como el nacimiento. Aspectos de la vida diaria en el hogar medieval se ritualizaban, como el recitado, antes de la comida, de la oración del *De profundis*, en memoria de los difuntos.

Las ideas médicas sobre salud, edad y género giraban en torno al concepto de cuerpo humano como microcosmos, en equilibrio con el macrocosmos del mundo natural creado. La medicina se fundaba en la teoría humoral, según la cual el cuerpo humano constaba de cuatro elementos básicos, componentes también del universo: fuego, agua, tierra y aire. El fuego, caliente y seco, producía la bilis amarilla y la complexión colérica; el agua, fría y húmeda, generaba la flema y la disposición flemática; la tierra, fría y seca, producía la bilis negra y nos llevaba a la complexión

melancólica; el aire, caliente y húmedo, creaba la sangre y el temperamento sanguíneo. Para la buena salud se requería el equilibrio humoral. Se creía que esas sustancias fluctuaban en el cuerpo según la edad y el sexo.

El microcosmos de la vida humana se consideraba en correspondencia con las medidas temporales del sistema cosmológico. Lo representaban cabalmente las cuatro estaciones: la infancia equivalía a la primavera, la juventud al verano, la madurez al otoño y la vejez al invierno. Cada una de esas edades estaba bajo el influjo de un planeta, al que se le concedía determinadas propiedades. Persistía ese marco con la división de las edades adelantada por Isidoro de Sevilla (siglo VII): *infantia* (0-7 años), *pueritia* (7-14 años), *adolescentia* (14-21 años), *iuventus* (21-49 años) *gravitas* (50-72 años) y *senectus* (desde los 72 años en adelante).

El medieval se desenvolvía entre distintas escalas temporales. Había un tiempo cósmico y natural, un tiempo cultural y social, un tiempo institucional o calendárico. Al considerar la medida del tiempo en relación con la trayectoria vital del individuo, cabe reflexionar sobre tres modos diferentes: tiempo diario, tiempo religioso y tiempo generacional. El tiempo diario se enraíza en la repetición de las rutinas diarias, experimentadas a través del cuerpo y en el contexto espacial del hogar. El tiempo religioso desempeñaba un papel clave en la vinculación de la vida del individuo con la escala de tiempo natural y cosmológica, por ejemplo, a través de los espacios y la cultura material de la comunidad parroquial. El tiempo ocupaba un lugar central en el control de los ciclos religiosos y confería un significado a las transiciones de un evento a otro: festividades, fastos, peregrinaciones y ritos asociados al decurso de la vida. La norma canónica medieval controlaba los alimentos que podían tomarse en determinados días de la semana o durante la Cuaresma, bodas, funerales.

La vida social se organizaba en torno a las fiestas religiosas y se estructuraba en cohortes de edades. Antes del matrimonio, los jóvenes de ambos sexos se inscribían en cofradías vinculadas a la parroquia. Una vez casados, la iglesia continuaba aportando el foco principal de vida social, en particular para las mujeres, mientras que la taberna era el refugio del marido. Sea en romería, trabajo o diversión, la vida social de la comunidad medieval se estructuraba de acuerdo con la edad y sexo. La perspectiva del decurso vital anima también la consideración de tiempo generacional, un sentido narrativo del tiempo fundado en los lazos de linaje y afectivos entre miembros de la familia u otros grupos institucionales (gremios y monasterios).

La literatura medieval aporta una dimensión complementaria a los estudios históricos. Los autores ingleses medievales mostraban un manifiesto interés en aspectos del envejecimiento y el concepto de las edades del hombre. Los escritores del siglo XIV, pensemos en Geoffrey Chaucer, William Langland y el anónimo autor de *Sir Gawain and the Green Knight*, adoptaron un enfoque concorde con el modelo de la vida como un curso recorrido en diferentes fases.

—Luis Alonso



DISCURSO SOBRE LA NATURALEZA DE LAS EXTREMIDADES

Por Richard Owen (1848). Edición de S. Balari y G. Lorenzo. KRK, Oviedo, 2012.

El retorno de Owen

Ocaso y renacimiento de la forma orgánica

El paleontólogo y anatomista británico Richard Owen (1804-1892) es una de las figuras centrales de la biología decimonónica. A lo largo de su dilatada carrera publicó más de 600 obras, fue fundador y director del Museo Británico de Historia Natural y participó activa y públicamente en muchas de las polémicas que convulsionaron la historia natural del siglo XIX. Hasta hace muy poco, Owen era fundamentalmente recordado como el gran perdedor de una de ellas: la que, tras la publicación de *El origen de las especies*, lo enfrentó a Charles Darwin a propósito de la teoría de la evolución por selección natural.

La lectura que de esta controversia se forjó en el marco de la Síntesis Moderna convirtió al biólogo británico en el antihéroe por excelencia de la biología predarwinista. Sin embargo, en los últimos años Owen ha pasado de ser retratado como defensor de un esencialismo incompatible con el evolucionismo a ser reivindicado como morfólogo sobresaliente y ancestro conceptual de la biología evolutiva del desarrollo (evo-devo).

La transformación experimentada en la percepción historiográfica, filosófica y biológica de Owen refleja las sacudidas teóricas experimentadas por la biología evolutiva desde la institucionalización de la Síntesis Moderna e ilustra de un modo ejemplar la relación entre la historia y el presente de la ciencia. En este contexto, la iniciativa de traducir por vez primera la obra de Owen al castellano no puede ser más que bienvenida. *Sobre la naturaleza de las extremidades* es un texto particularmente bien elegido, pues al tratarse de la transcripción de uno de los discursos de Owen, condensa y presenta de un modo accesible los grandes pilares de su pensamiento. Es más, esta edición no se conforma con traducir un gran clásico. Sergio Balari y Guillermo Lorenzo no solo han cuidado la calidad de la prosa oweniana, sino que, además, en tanto que biolingüistas enzarzados en los debates en torno a la evolución del lenguaje, saben de lo que hablan. En el marco de una esmerada edición, una extensa e informada introducción precede al manuscrito, estructurado por marcas de lectura, aclarado por numerosas notas y acompañado de un completo diccionario biográfico.

La obra de Owen es, ante todo, una reivindicación de la centralidad teórica de la forma orgánica en el dominio biológico, una cuestión que, después de un largo eclipse, vuelve a protagonizar la biología actual.

La autonomía de la forma. Probablemente la mayor conquista teórica de Owen consistió en establecer una clara distinción entre las dimensiones morfo-

lógica y funcional de los organismos, una dualidad que había mantenido dividida a la anatomía continental durante más de medio siglo: ¿con qué criterio habían de compararse los organismos si se aspiraba a organizar la desbordante diversidad de las especies? ¿Debían tenerse en cuenta las funciones vitales que regulaban su existencia o más bien las relaciones espaciales entre sus partes? La labor de clarificación conceptual llevada a cabo por el anatomista británico y, en particular, su distinción entre «analogía» y «homología», ilustrada por el caso ejemplar de las extremidades vertebradas, cumplió una función decisiva en el triunfo de la forma: la analogía se refiere a una semejanza superficial relacionada con el desempeño de funciones semejantes (las alas de la mariposa y el pájaro); la homología designa un tipo de identidad esencial: aquella que puede establecerse en función del número, la posición y las conexiones de los componentes de una estructura (los huesos del ala de un pájaro y la pata de un caballo), al margen de su variación en forma (contorno y tamaño de los huesos) y función (volar, correr...).

La definición oweniana de homología desempeñó una función esencial en la postulación darwinista del transformismo: ciertas partes —argumentó Darwin en el *Origen*— son homólogas porque proceden de un antepasado común. Si bien esta explicación de la semejanza revolucionó la morfología, que se convirtió rápidamente al evolucionismo, la Síntesis Moderna consideró que la investigación de la semejanza estaba contaminada de un esencialismo incompatible con la teoría darwinista de la evolución y la homología se redefinió en términos estrictamente filogenéticos: dos estructuras son homólogas *si y solo si* proceden de un mismo antepasado.

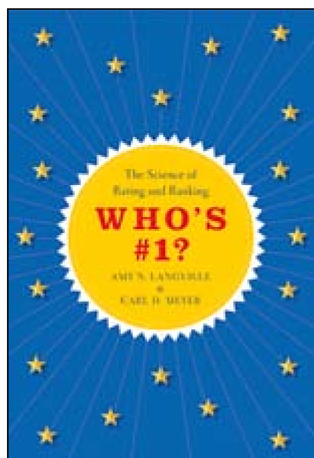
No obstante, el reciente renacimiento de la morfología ha permitido identificar un error filosófico esencial en la redefinición filogenética de la semejanza y reivindicar la definición oweniana de homología: el establecimiento de la semejanza entre las partes es una labor epistemológicamente previa a la inferencia de relaciones genealógicas entre ellas. O, de otro modo: la ascendencia común puede explicar la homología, pero no la define. De hecho, como ya señalara Owen, existen estructuras homólogas no ya entre diferentes especies, sino en un mismo organismo (las vértebras, por ejemplo), que no tiene sentido atribuir a la comunidad de descendencia.

Las causas de la forma. El interés de Owen radica en que no solo fue un morfólogo puro, sino que acabó abrazando el transformismo y defendió la necesidad de investigar las causas naturales que habrían gobernado el origen de las especies. Al igual que Darwin, Owen concibió la evolución como un proceso de divergencia creciente, pero se negó a aceptar que una fuerza externa a los propios organismos como la selección natural pudiera explicar este proceso. Al contrario, Owen atribuyó esta divergencia histórica a dos grandes fuerzas internas: una fuerza estructural, que regularía las semejanzas, y una fuerza adaptativa, que daría lugar a la diversificación de las formas.

Salvando los anacronismos, la oposición al «externalismo adaptativo» y la apuesta por un internalismo causal asociado al desarrollo han hecho que algunos autores hayan interpretado la obra de Owen como premonitoria del giro epistemológico que caracterizó el nacimiento de la evo-devo. Desde esta perspectiva, la selección ambiental de la variación fenotípica no es suficiente para explicar por qué se generan ciertas formas y no otras; solo volviendo la mirada a las constricciones del desarrollo puede explicarse por qué, por ejemplo, algunas estructuras como las extremidades vertebradas permanecen estables durante largos períodos evolutivos, mientras otros rasgos están sujetos a variaciones adaptativas que, en efecto, pueden explicarse en virtud de la selección natural.

En definitiva, tanto quienes deseen disfrutar de la prosa de una de las figuras más controvertidas y apasionantes de la biología decimonónica como quienes persigan descubrir en el pasado la inspiración para enfrentar las cuestiones que sigue interrogando la biología del presente agradecerán la lectura de *Sobre la naturaleza de las extremidades*.

—Laura Nuño de la Rosa
Instituto Konrad Lorenz de Investigación sobre Evolución y Cognición, Viena



THE SCIENCE OF RATING AND RANKING. WHO'S #1?

Por Amy N. Langville y Carl D. Meyer. Princeton University Press, Princeton, 2012.

La era de los *rankings*

O cómo decidir quién es mejor que quién

¿En cuántas de las decisiones que tomamos cada día tenemos en cuenta la interminable lista de *rankings* que existen? Los mejores libros del momento, para decidir nuestra próxima lectura; los mejores colegios o universidades, si es que pretendemos tomar la decisión óptima para nuestros hijos; las mejores películas de la cartelera, el *top* 10 de las canciones, las mejores playas donde perderse, los blogs más populares... Reconozca el lector sin remilgos que sí, que no se puede evitar, que los consultamos, nos los creemos, y hasta los seguimos con fe inquebrantable, aunque en la mayor parte de los casos no tenemos ni la más remota idea de cómo se han confeccionado.

Un *ranking* especialmente notable, que usamos continuamente —aunque quizá sin ser tan conscientes de ello— es aquel con el que el buscador de Google establece la «importancia» de las páginas web y que luego utiliza para ordenar los resultados de cada búsqueda. Posiblemente este *ranking* sea el secreto (o uno de los secretos) que explica por qué Google se ha convertido en unos pocos años en el estándar de los buscadores de Internet, y más aún, en un auténtico icono de la tecnología.

La historia es probablemente bien conocida: allá por 1998, dos estudiantes de doctorado, Sergei Brin y Larry Page, daban los últimos retoques al algoritmo (PageRank) que emplearían en el motor de búsqueda de Google. Apenas quince años después, Google se ha convertido en, quizá, la más importante empresa tecnológica del mundo y, sobre todo, ha cambiado la manera en la que manejamos y entendemos la información contenida en la Red. Un auténtico cambio de paradigma, siguiendo a Kuhn. Por cierto, conviene señalar que las ideas que subyacen en ese algoritmo de ordenación son, aunque ingeniosas, bastante sencillas, y están al alcance de cualquiera con conocimientos básicos de álgebra lineal.

Langville y Meyer han tratado en profundidad los métodos y la tecnología en que se apoyan los buscadores de Internet en su anterior (completo y excelente, aunque más técnico) *Google's PageRank and beyond: The science of search engine rankings* (Princeton University Press, 2006). En el libro que nos ocupa extienden ese estudio a *rankings* y ordenaciones en otros contextos y disciplinas, haciendo especial hincapié en las clasificaciones deportivas.

La idea es bien atractiva, sobre todo en el mundo anglosajón, en el que las estadísticas y los *rankings* deportivos son motivo de ocupación, preocupación y hasta fanatismo para un buen porcentaje de los ciudadanos. Puede que ello suponga una dificultad para un lector español que, probablemente, no estará familiarizado con la estructura de las ligas universitarias, la NFL o la NHL, o la jerga de SuperBowls, yardas, carreras, etcétera, que conforman los ejemplos con los que los autores ilustran los diferentes sistemas de ordenación. Y es posible que encuentre más sugerentes algunos otros ejemplos que se analizan en el libro, como los sistemas electorales (con sus paradojas y enseñanzas), los *rankings* de mejores libros o universidades, el sistema Elo (si es que es aficionado al ajedrez), los índices de desarrollo humano, etcétera, y, por supuesto, los buscadores de Internet. En todo caso, siempre podrá aplicar las múltiples alternativas de ordenación que se proponen en el libro a su deporte favorito para así, quizá, poder variar a su gusto la clasificación final de aquella temporada de nefasto recuerdo, en la que su equipo no consiguió ganar pero en la que, si se hubiera tenido en cuenta que...

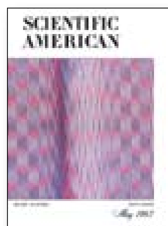
El libro está pensado para un lector con ciertos conocimientos matemáticos. En particular, debe sentirse cómodo con algunas nociones de álgebra lineal, como las que se aprenden en un primer curso de nivel universitario, dado que es el lenguaje en el que se escriben una buena parte de los modelos descritos. Pese a que los ejemplos e ilustraciones suelen ser sencillos y se siguen con facilidad, un cierto manejo de la notación matricial y de conceptos como autovalores y autovectores resulta imprescindible para entender adecuadamente los desarrollos. Aunque, dándole la vuelta al argumento, puede que constituya un aliciente para recordar —en algunos casos— o visitar por vez primera —en otros— el lenguaje del álgebra lineal, ese que a muchos les pudiera haber resultado abstruso en algún momento, pero cuya elegancia y poder demuestran las aplicaciones contenidas en este libro. Aplicaciones y ejemplos que bien podrían hasta servir como material didáctico para algún hipotético lector y profesor de matemáticas a la par.

Especialmente interesantes y entretenidos resultan los *asides*, las notas al final de cada capítulo, en los que los autores recogen y se recrean con ejemplos curiosos, chascarrillos, datos biográficos e históricos, conexiones con otras disciplinas, etcétera, incluyendo una sorprendente mención a las habilidades matemáticas del filósofo, poeta y teólogo mallorquín Ramón Llull.

El libro está bien escrito, el estilo es ameno y, con las salvedades mencionadas, se lee con facilidad. Una estupenda oportunidad para internarse en el mundo de las ordenaciones, ubicuas, a veces paradójicas, y siempre prestas a la polémica y la discusión.

—Pablo Fernández Gallardo
Departamento de Matemáticas
Universidad Autónoma de Madrid

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

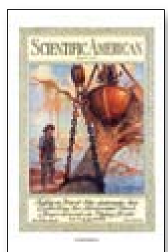


Mayo 1963

El mensaje de las feromonas

«Cabe imaginar que en otros mundos haya civilizaciones donde la comunicación se efectúe totalmente por vías olfativas o gustativas mediante el intercambio de sustancias químicas. Por inverosímil que parezca, esta posibilidad no puede descartarse. Al menos sobre el papel, no resulta difícil diseñar un sistema de comunicación química que permita transmitir abundante información de manera eficaz. La noción de un sistema de comunicación como este nos resulta chocante porque nuestra percepción se halla fuertemente determinada por nuestros peculiares hábitos auditivos y visuales. Esta limitación perceptiva se observa también entre los estudiosos de las conductas animales, quienes se han decantado por las especies cuyo procedimiento de comunicación se asemeja al nuestro y, por tanto, resulta más accesible al análisis. Pero cada vez se hace más evidente que en numerosas especies animales, quizás en la mayoría, predominan los sistemas de comunicación química.

—Edward O. Wilson»



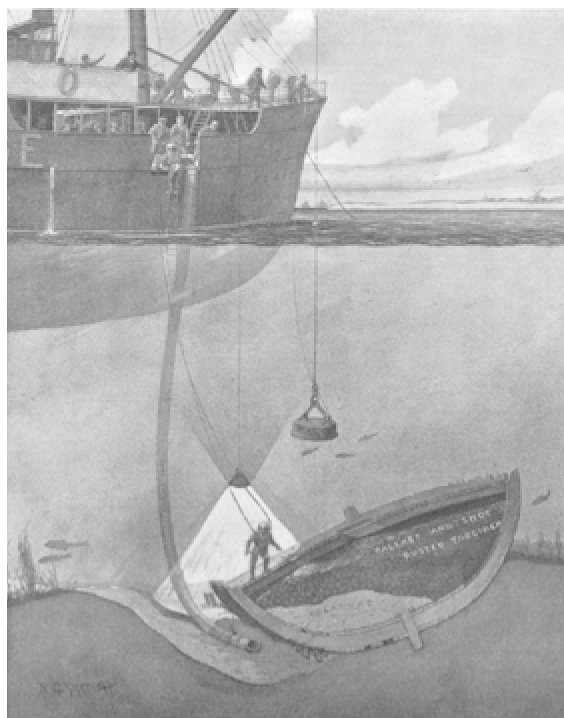
Mayo 1913

La quema de turberas en Alemania

«Las colosales molestias por humo que en tiempos padeció, en mayor o menor grado, la mayor parte de Europa están ahora a punto de desaparecer gracias al declive de la antigua costumbre alemana de quemar las turberas. Formado por la acumulación de turba originada por la descomposición parcial de musgos y otros restos vegetales, el suelo de las turberas no resulta apto ni para el cultivo ni para el pastoreo. En comparación con los modernos métodos de avenamiento a fondo, apisonado y mezclado con el subsuelo, además de una recuperación permanente de los terrenos, la quema constituye un proceso tan antieconómico, en cuanto al uso del suelo, que ha sido abandonada salvo en regiones muy alejadas de las poblaciones.»

Manufactura de calzado

«Numerosos fabricantes de otras industrias no pueden permitirse desechar las máquinas obsoletas. En ellas han invertido demasiado dinero. Sus costos de fabricación suelen ascender porque la maquinaria se queda anticuada. Sin embargo, cada nueva invención de la empresa United Shoe Machinery obliga a retirar centenares de máquinas a expensas de la empresa; en un solo año se han descartado no menos de 4000 máquinas para hacer sitio a otras que incorporaban las últimas mejoras. Esa es la causa de que la población pueda comprar zapatos a precios adecuados para todos los bolsillos.»

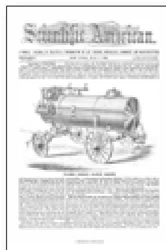


¡Arriba!: Un equipo de rescate planeaba utilizar un potente electroimán para recuperar un tesoro enterrado, 1913.

Buscando el tesoro

«La fragata británica *Lutine* se hundió en 1799 con diez toneladas de oro y plata a bordo. La principal dificultad de las tareas de recuperación la representan las enormes masas de munición y lastre oxidados en las que se hallan incrustadas las monedas. Cuando se reanuden los trabajos a principios de la próxima primavera, el *Lyons* llevará a bordo un torno de electroimán con una capacidad elevadora de tres toneladas. Unas cargas explosivas romperán las masas de metal en trozos lo bastante pequeños para que el imán pueda moverlos.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CVIII, N.º 20, 17 DE MAYO DE 1913



Mayo 1863

¿Darwin descreído?

«En los últimos años, los hombres de ciencia y otros han discutido con fervor en torno al trabajo del señor Darwin sobre *El origen de las especies*. Por su tendencia descreída, en la mayoría de las revistas inglesas y estadounidenses su tratado ha sido duramente criticado; no por los hechos que se aportan en él, sino por las conclusiones de su autor. Parece que este no ha sido correctamente entendido, a juzgar por la publicación de las seis conferencias dadas a los obreros por Thomas H. Huxley, de la Real Sociedad. A grandes rasgos, en las conferencias se indaga sobre el origen de las especies y se debate sobre las causas de los fenómenos en la naturaleza orgánica. Por esta entendemos lo que crece, posee vida y puede multiplicarse. Lo ejemplifica una semilla de planta en contraste con un grano de arena. Todos los organismos comienzan su existencia en una célula de óvulo o simiente, y se cree que cada simiente ha sido especialmente creada con la función y las capacidades específicas para la reproducción, tal como se afirma en las Escrituras.»

El café en la guerra

«El café es el lujo del soldado, privado del cual se ve a sí mismo como el individuo peor tratado que se pueda imaginar. En las marchas, para mayor comodidad, se mezclan café y azúcar. Cada hombre lleva su taza de latón para prepararse el café y antes se olvidaría del fusil que del recipiente donde se prepara la bebida.»



INFORME ESPECIAL: LA INFORMACIÓN

La paradoja de la información

Peter J. Denning y Tim Bell

¿Existe la teoría de la información?

Jérôme Segal

SALUD

Avances en medicina regenerativa

VV.AA.

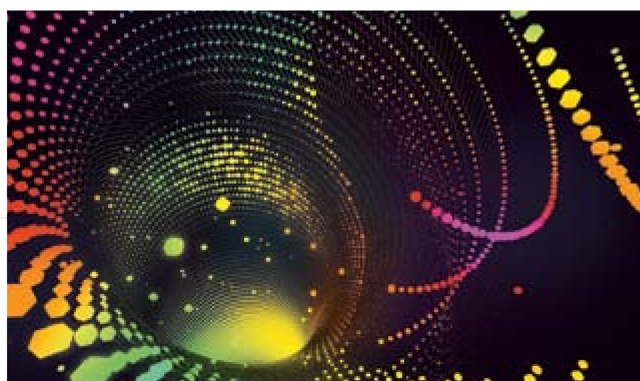
El futuro de la reparación tisular.

ECOLOGÍA

La reserva marina de Raja Ampat

Brendan Borrell

La población de este archipiélago indonesio lidera los esfuerzos para proteger los arrecifes de coral de los estragos de la pesca. Con ello intenta defender también su propia subsistencia.



FÍSICA DE PARTÍCULAS

Heraldos fantasmales de nueva física

Martin Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod

Los neutrinos, los animales más extraños del zoo de las partículas, podrían abrirnos las puertas a espacios inexplorados.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Barcelona
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14 - 08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

Madrid
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Carlos Lorenzo: *Los orígenes de la creatividad y Dar vida al ADN fósil*; José Manuel Vidal Donet: *La nueva amenaza de los poxvirus*; Yago Ascasibar: *Origen y evolución de los cúmulos estelares*; Juan Arana: *El arte de editar a Leibniz*; Juan P. Adrados: *¿A qué se debe la electricidad estática?*; Bruno Moreno: *Apuntes y Líneas de defensa*; Ana Izcue: *La malnutrición favorece el desarrollo de bacterias nocivas*; Alfredo Marcos: *Filosofía de la ciencia*; Pere Molera: *Taller y laboratorio*; J. Vilardell: *Hace...*

Copyright © 2013 Scientific American Inc., 75 Varick Street, New York, NY 10013-1917.

Copyright © 2013 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España